

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

SOUVISLOST VAD ŘEZU S ŘEZNÝMI PARAMETRY PŘI ŘEZÁNÍ ABRAZIVNÍM VODNÍM PAPRSKEM

CONNECTION OF MISTAKES CUT WITH CUTTING CHARACTERISTICS
AT ABRASIVE WATER JET CUTTING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PAVEL MAREŠ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. KAREL OSIČKA, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Pavel Mareš

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Souvislost vad rezu s reznými parametry pri rezání abrazivním vodním paprskem

v anglickém jazyce:

Connection of mistakes cut with cutting characteristics at abrasive water jet cutting

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na základě vzorků vytvořených metodou dělení abrazivním vodním paprskem při variaci rezných parametrů určit oblast, kdy nedochází k náhodné a skokové změně drsnosti řezné hrany. Na vzorky použít běžně používané materiály

Cíle diplomové práce:

Úvod.

Princip vodního paprsku.

Rozbor technologických možností metody dělení materiálů abrazivním vodním paprskem.

Rozbor použitých vzorků materiálu.

Vyhodnocení vzorků, analýza a doporučení vhodných rezných parametrů.

Technicko-ekonomické vyhodnocení.

Diskuze.

Závěr.

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je na základě vzorků vytvořených metodou dělení abrazivním vodním paprskem při variaci řezných parametrů určit oblast, kdy nedochází k náhodné a skokové změně drsnosti řezné hrany.

Klíčová slova

vodní paprsek, abrazivo, technologické parametry, jakost povrchu

ABSTRACT

The aim of this thesis is to determine the area where there is no random step change in cutting edge roughness. This area is established on the basis of samples created by the abrasive water jet cutting method with variation of technologic parameters.

Key words

water jet, abrasive material, technologic parameters, surface texture

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MAREŠ, P. *Souvislost vad řezu s řeznými parametry při řezání abrazivním vodním paprskem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 78 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Osička, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Souvislost vad řezu s řeznými parametry při řezání vodním paprskem* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Pavel Mareš

PODĚKOVÁNÍ

Za cenné rady, připomínky a informace poskytnuté při vypracování této diplomové práce děkuji Ing. Karlu Osičkovi Ph.D. a Ing. Dušanu Lukšovi.

OBSAH

| | |
|---|----|
| Abstrakt..... | 4 |
| Prohlášení..... | 5 |
| Poděkování | 6 |
| Obsah | 7 |
| Úvod..... | 10 |
| 1 Rozbor technologie vodního paprsku | 11 |
| 1.1 Nekonvenční technologie | 11 |
| 1.1.1 Nekonvenční technologie obrábění..... | 11 |
| 1.1.2 Rozdělení nekonvenčních technologií obrábění | 11 |
| 1.1.3 Výhody nekonvenčních technologií obrábění..... | 12 |
| 1.2 Technologie obrábění vodním paprskem..... | 12 |
| 1.2.1 Historie obrábění vodním paprskem | 12 |
| 1.2.2 Fyzikální princip obrábění vodním paprskem..... | 13 |
| 1.2.3 Princip technologie vodního paprsku | 13 |
| 1.2.4 Základní rozdělení technologie vodního paprsku..... | 14 |
| 1.2.5 Výhody technologie vodního paprsku | 15 |
| 1.2.6 Nevýhody technologie vodního paprsku | 16 |
| 2 Pracovní zařízení pro řezání vodním paprskem..... | 17 |
| 2.1 Hydraulická jednotka | 18 |
| 2.1.1 Hydraulické čerpadlo..... | 19 |
| 2.1.2 Multiplikátor..... | 19 |
| 2.1.3 Akumulátor..... | 20 |
| 2.1.4 Filtry | 20 |
| 2.2 Rozvod vysokotlaké vody | 21 |
| 2.3 Řezací hlavice | 22 |
| 2.3.1 Vodní tryska | 22 |
| 2.3.2 Abrazivní tryska se směšovací komorou..... | 23 |
| 2.4 Souřadnicový CNC stůl..... | 24 |
| 2.5 Abrazivo..... | 25 |
| 3 Rozbor technologických možností vodního paprsku | 27 |
| 3.1 Technologie dělení vodním paprskem..... | 27 |
| 3.1.1 WJM – Water Jet Machining | 27 |
| 3.1.2 AWJ – Abrasive Water Jet | 28 |
| 3.1.3 ASJ – Abrasive Slurry Jet | 29 |

| | |
|--|----|
| 3.1.4 IJM – Ice Jet Machining | 29 |
| 3.1.5 DJW – Dynamic Water Jet | 30 |
| 3.1.6 MWJ – Micro Water Jet..... | 31 |
| 3.1.7 LMJ – Laser Micro Jet..... | 31 |
| 3.2 Technologie soustružení vodním paprskem | 32 |
| 3.3 Technologie vrtání vodním paprskem..... | 33 |
| 3.4 Technologie frézování vodním paprskem | 34 |
| 3.5 Technologie gravírování vodním paprskem..... | 34 |
| 3.6 Využití vodního paprsku v průmyslu | 35 |
| 3.6.1 Využití vodního paprsku ve strojírenském průmyslu | 35 |
| 3.6.2 Využití vodního paprsku ve stavebním průmyslu | 35 |
| 3.6.3 Využití vodního paprsku v automobilovém průmyslu | 35 |
| 3.6.4 Využití vodního paprsku v leteckém a kosmickém průmyslu | 36 |
| 3.6.5 Využití vodního paprsku v potravinářském průmyslu | 37 |
| 4 Technologické parametry a kvalita řezu vodního paprsku | 38 |
| 4.1 Technologické parametry | 38 |
| 4.1.1 Hydraulické parametry | 38 |
| 4.1.2 Abrazivní parametry | 38 |
| 4.1.3 Směšovací parametry | 39 |
| 4.1.4 Parametry, které přímo souvisejí s procesem obrábění | 39 |
| 4.2 Řezná a deformační zóna dělicího řezu | 39 |
| 4.3 Kvalita povrchu řezu | 41 |
| 4.4 Hodnocení struktury povrchu | 42 |
| 4.5 Vady řezu | 43 |
| 4.5.1 Rýhy | 43 |
| 4.5.2 Odchylka kolmosti | 43 |
| 4.5.3 Neúplný konec řezu | 45 |
| 4.5.4 Povrchové vady | 45 |
| 5 Experimentální zjištění kvality řezu v souvislosti se změnami technologických podmínek | 46 |
| 5.1 Použité pracovní zařízení pro řezání vodním paprskem..... | 46 |
| 5.2 Použité měřicí zařízení na zjištění průměrné aritmetické úchyly | 47 |
| 5.3 Rozbor použitých vzorků | 48 |
| 5.4 Vlastní experiment..... | 50 |
| 5.4.1 Řezné parametry..... | 51 |
| 5.4.2 Řezání vzorků z oceli S355J0 EN 10025-2:2004..... | 51 |

| | |
|---|----|
| 5.4.3 Řezání vzorků z hliníku EN AW-5083 | 54 |
| 5.4.4 Řezání vzorků z plastického materiálu PE-HWU | 57 |
| 5.4.5 Řezání vzorků ze skla | 60 |
| 5.4.6 Vyhodnocení | 63 |
| 6 Technicko-ekonomické vyhodnocení | 64 |
| 6.1 Ekonomické zhodnocení technologie vodního paprsku | 64 |
| 6.2 Závislost nákladů na kvalitě řezu | 64 |
| 6.2.1 Předpoklady výpočtu | 65 |
| 6.2.2 Určení nákladů | 65 |
| 6.2.3 Vyhodnocení | 67 |
| Diskuze | 69 |
| Závěr | 71 |
| Seznam použitých zdrojů | 72 |
| Seznam použitých zkratk a symbolů | 75 |
| Seznam příloh | 78 |

ÚVOD

Voda je pro svou sílu a nezměrný potenciál využívána lidstvem již od pradávna. Teprve v druhé polovině minulého století však našla využití i při obrábění materiálů.

Samotná technologie obrábění abrazivním vodním paprskem je poměrně mladá, její počátky spadají do roku 1974, kdy začíná experimentování s přidáváním abraziva do vodního paprsku. Právě tato inovace umožňuje vodnímu paprsku obrábět téměř jakékoliv materiály, a to i nové materiály těžko obrobitelné konvenčními technologiemi. Patří k nim například vysokopevnostní oceli, titan a jeho slitiny, superslitiny na bázi niklu nebo keramika a sklo.

Technologie obrábění vodním paprskem nachází díky svým výhodám uplatnění v mnoha odvětvích průmyslu, přičemž v některých z nich je dokonce nenahraditelná. Mezi největší výhody této technologie patří nejenom možnost řezat téměř všechny materiály, ale také skutečnost, že při obrábění nevzniká téměř žádná tepelná ani deformačně ovlivněná oblast.

Jedním z cílů této diplomové práce je vysvětlení principu technologie vodního paprsku. Zaměřuje se přitom na rozbor technologie vodního paprsku, a to na její zařazení v nekonvenčních technologiích, historii, princip funkce, rozdělení, výhody a nevýhody. Dále se zabývá principem funkce a složením zařízení pro řezání vodním paprskem.

Dalším cílem práce je rozbor technologických možností vodního paprsku. Tato část se zaměřuje na širokou škálu technologií dělení vodním paprskem a na jeho využití v různých odvětvích průmyslu.

Tato diplomová práce dále popisuje problematiku souvislosti vad řezu s technologickými parametry při řezání vodním paprskem. V této části se práce zaměřuje na rozdělení a rozbor technologických parametrů, kvalitu povrchu řezu a vady řezu.

V neposlední řadě se zabývá experimentem, jenž má za úkol zjistit souvislost kvality řezu se změnami technologických podmínek. V této části se nachází rozbor použitých vzorků materiálů, vyhodnocení vzorků, analýza a doporučení vhodných řezných parametrů.

1 ROZBOR TECHNOLOGIE VODNÍHO PAPRSKU

Úvodní kapitola je zaměřena na rozbor technologie vodního paprsku. První část této kapitoly se zabývá rozdělením a charakteristikou nekonvenčních technologií, do kterých spadá i technologie vodního paprsku. Poté se zaměřuje na historii a princip funkce řezání vodním paprskem. V neposlední řadě tato kapitola pojednává o výhodách a nevýhodách této technologie.

1.1 Nekonvenční technologie

Obecně řečeno jsou nekonvenční technologie alternativou k dnes již zavedeným klasickým technologiím. Využívají se v celém spektru technologií, od obrábění po tváření a svařování. V oblasti obrábění to jsou především metody založené na principu využití fyzikálního nebo chemického úběru materiálu. V oblasti tváření jsou to technologie, které používají nepevný nástroj, jako metody Guerin, Wheelon, Marform a Hydroform, a také metody, které mají výrazně odlišné rychlosti tváření, jako například metoda tváření výbuchem. U svařování jsou to speciální technologie jako svařování laserem, plazmou nebo svazkem elektronů [1, 2].

1.1.1 Nekonvenční technologie obrábění

Obrábění jako takové lze definovat jako proces, při kterém je požadovaný tvar nebo rozměr obrobku dosažen postupným odebráním částic materiálu, a to buď mechanickým, elektrickým nebo chemickým způsobem, nebo jejich kombinací. Z toho nekonvenční technologie obrábění lze charakterizovat jako všechny metody na principu elektrického a chemického úběru materiálu. A rovněž také metody na principu mechanického úběru materiálu, které nejsou provedeny přímým kontaktem nástroje s definovanou geometrií [1, 2].

1.1.2 Rozdělení nekonvenčních technologií obrábění

Nekonvenční technologie obrábění lze podle mechanismu odebrání materiálu rozdělit do tří hlavních skupin [3]:

- a) Technologie na mechanickém principu úběru materiálu:
 - obrábění vodním paprskem,
 - obrábění ultrazvukem.
- b) Technologie na tepelném nebo elektrotepelném principu úběru materiálu:
 - elektroerozivní obrábění,
 - obrábění laserovým paprskem,
 - obrábění plazmovým paprskem,
 - obráběním elektronovým paprskem.
- c) Technologie na chemickém nebo elektrochemickém principu úběru materiálu:
 - chemické obrábění,
 - elektrochemické obrábění.

1.1.3 Výhody nekonvenčních technologií obrábění

Hlavní výhoda nekonvenčních technologií obrábění spočívá ve skutečnosti, že při obrábění téměř nezáleží na mechanických vlastnostech obráběného materiálu (tvrdost, pevnost). Z toho plyne, že těmito technologiemi se dají obrábět materiály, které jsou jinak konvenčními technologiemi obrábění velmi těžko obrobitelné, nebo neobrobitelné (kalená ocel, slitiny titanu, kompozitní materiály, keramika). Mezi další výhody lze zařadit možnost obrábění značně nepravidelných tvarů, výrobu přesných miniaturních součástí a vhodnost uplatnění v automatizovaných provozech [1].

1.2 Technologie obrábění vodním paprskem

Tato podkapitola se zabývá technologií obrábění vodního paprsku. Pojednává o historii a principu této technologie. Dále se zabývá rozdělením, výhodami a nevýhodami vodního paprsku

1.2.1 Historie obrábění vodním paprskem

Počátky použití vodního paprsku sahají do druhé poloviny 19 století, kdy se v roce 1853 v Kalifornii začíná při těžbě zlaté rudy používat proud vody o tlaku několika desítek MPa. Tato metoda se ukázala být velmi produktivní, a tak se v období zlaté horečky začala rychle rozšiřovat.

Vznik myšlenky a vývoj technologie vodního paprsku se však datuje do druhé poloviny 20 století, kdy v roce 1950 lesnický inženýr Dr. Norman Franz začal studovat použití vysokotlakého vodního paprsku jako řezného nástroje. Studií zjistil, že při spuštění velmi těžkého závaží na vysokotlakou nádobu se sloupcem vody, která je napojená na úzkou trysku, vzniká vysokotlaký vodní impuls, který dokáže štípat dřevo. Později ve spolupráci s firmou McCartney Manufacturing vytvořil první komerční stroj, který byl použit na obrábění nábytku. Tento stroj však nedokázal dosáhnout nepřetržitosti paprsku vody.

V roce 1975 však společnost Flow tento nedostatek vyřešila vývojem nového zdroje vysokotlaké kapaliny – multiplikátorem, což umožnilo další rozvoj této technologie. Zásadní přelom nastal též v roce 1979, kdy Dr. Mohamed Hashish experimentoval s přidáním abraziva do vodního paprsku. Po přidání abraziva do paprsku se nejenom zvýšila rychlost obrábění, ale také se otevřela možnost řezat velmi tvrdé materiály, které se dříve touto metodou řezat nedaly.

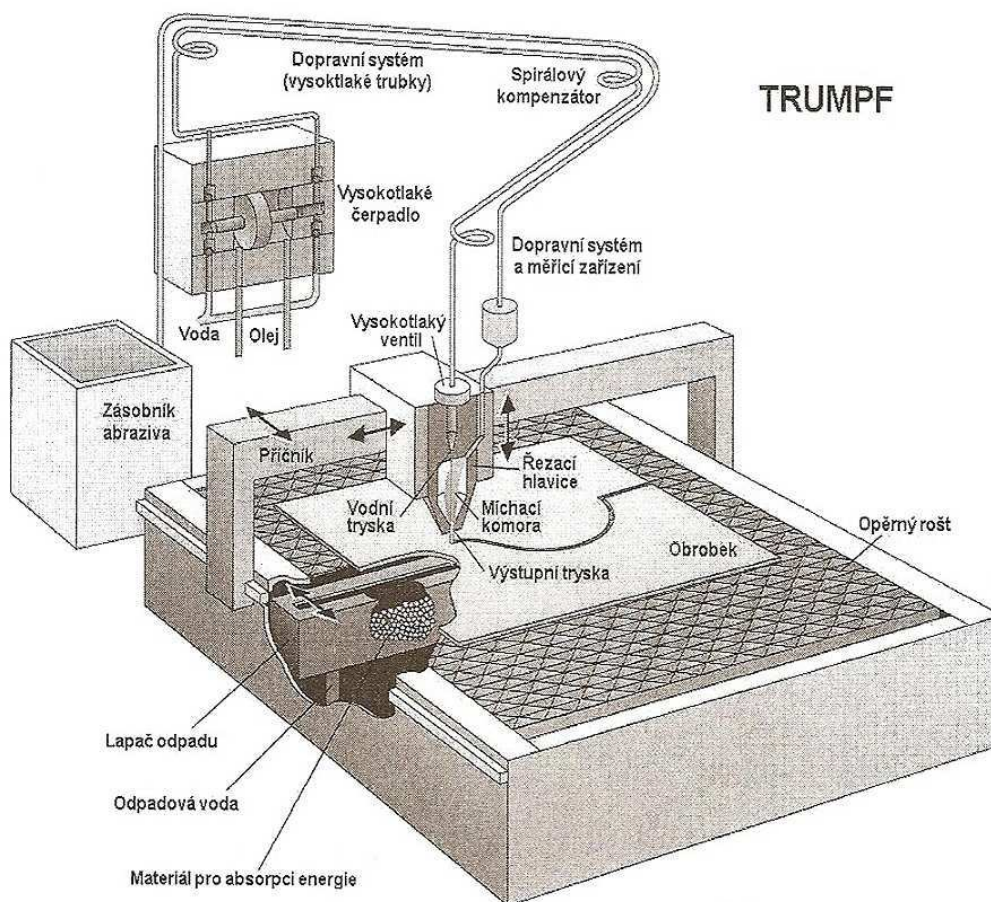
Od roku 1980 se tato technologie velmi rychle vyvíjela a postupně pronikala do různých odvětví průmyslu. Velké uplatnění našla v letectví a kosmonautice, neboť umožňovala řezat velmi pevné materiály od slitin titanu až po keramiku [4, 7].

1.2.2 Fyzikální princip obrábění vodním paprskem

Princip metody obrábění vodním paprskem spočívá v přeměně kinetické energie vysokotlakého vodního paprsku, který dosahuje rychlostí proudění až 900 m.s^{-1} (metoda WJM), nebo vysokotlakého vodního paprsku s abrazivem (metoda AWJ) na mechanickou práci [5].

1.2.3 Princip technologie vodního paprsku

Podstatou technologie je obrušování děleného materiálu účinkem dopadajícího vodního paprsku. Tlak vody se vytváří ve vysokotlakém zdroji – hydraulické jednotce, která se skládá z několika částí, mezi něž patří vysokotlaké hydraulické čerpadlo, multiplikátor a akumulátor. Poté se natlakovaná voda pomocí potrubí přenáší na řezací hlavici, která je umístěna na portálu stroje. Zde se vytváří usměrněný vysokotlaký vodní paprsek. V řezací hlavici se pak nachází (pokud jde o metodu AWJ) směšovací komora, kde se k vodnímu paprsku přidává abrazivo. Po obrábění se voda s abrazivem dostává do lapače nečistot, kde se abrazivo usazuje a po skončení procesu ho lze recyklovat. Celý proces obrábění se uskutečňuje na CNC portálovém stroji (obr. 1.1) podle vloženého programu. Stroj řídí jak dráhu řezu, tak pohyb řezací hlavy [5, 6, 7].



Obr. 1.1 Schéma stroje [8].

1.2.4 Základní rozdělení technologie vodního paprsku

Technologie obrábění vodním paprskem se nejčastěji dělí dle typu pracovního média na dvě základní metody [8]:

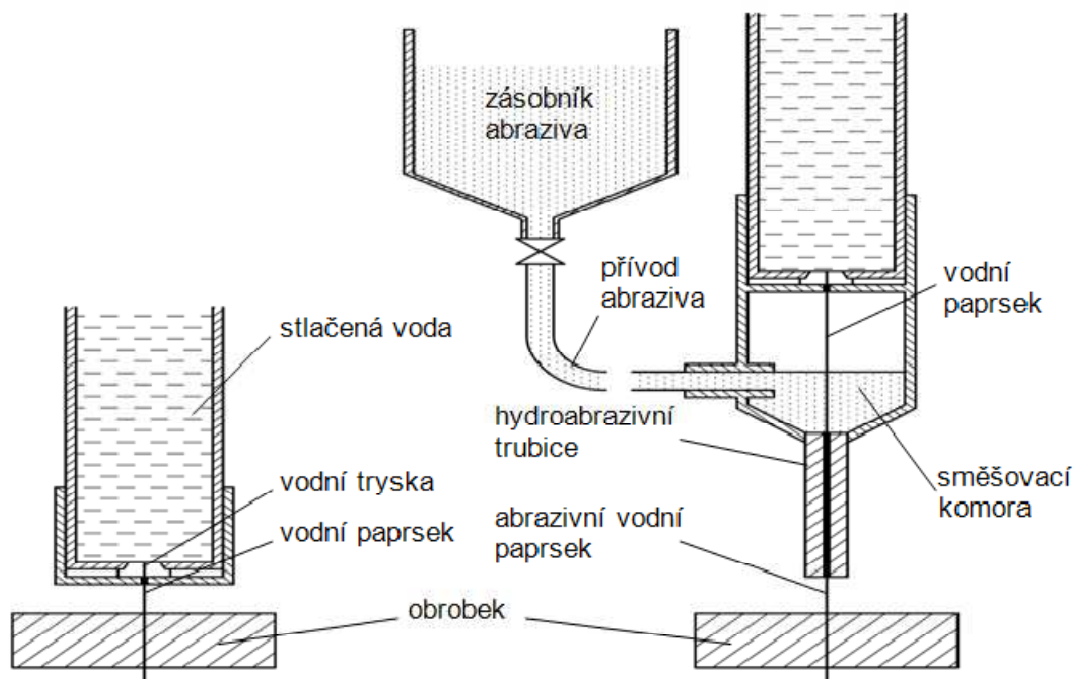
- WJM – Water Jet Machining,
- AWJ – Abrasive Water Jet Machining.

Metoda WJM:

Tato metoda využívá paprsku bez přídavku abraziva. Má nižší řezací účinek než metoda AWJ. Používá se pro obrábění měkkých a tenkých materiálů, jako jsou papír, pryž, guma, lino. Je zejména vhodná tam, kde není možné použít abrazivo, například při dělení zmrzlých potravin.

Metoda AWJ:

Tato metoda využívá paprsku s přídavkem abraziva. V praxi je tato technologie používána častěji. Má vyšší řezací účinek než metoda WJM a je vhodná i na řezání velmi tvrdých materiálů, jako jsou například keramika, sklo a kámen. Oproti metodě WJM má rozdílnou konstrukci řezací hlavičky (obr. 1.2), kde je navíc umístěna směšovací komora, která slouží k přidání abraziva do vodního paprsku.



Obr. 1.2 Schematické znázornění rozdílu řezací hlavičky metody WJM (vlevo) a metody AWJ (vpravo) [1].

1.2.5 Výhody technologie vodního paprsku

Jednou z největších výhod technologie obrábění vodním paprskem je skutečnost, že při obrábění nedochází k téměř žádnému tepelnému ovlivnění řezaného materiálu. Experimentálně bylo zjištěno, že při obrábění se zvýší teplota v místě řezu pouze nepatrně - přibližně o 20 °C, což je v porovnání s ostatními technologiemi téměř bezvýznamné. I takové zvýšení teploty však může vadit některým velmi citlivým materiálům, jako jsou polykarbonátové plasty nebo různé druhy biomateriálů. Tato technologie má řadu dalších neméně významných výhod, mezi které patří [5, 7]:

- poměrně vysoká rychlost řezání,
- velká energetická účinnost - okolo 80 % (oproti laseru, kde se pohybuje okolo 5 až 10 %),
- v místě řezu není materiál tepelně ovlivněn, nedochází tudíž ke vzniku nežádoucích struktur, jako je například martenzit u oceli,
- studený řez umožňuje obrábět materiály s malým odvodem tepla, jako jsou například plasty,
- lze obrábět materiály, které jsou při zvýšené teplotě citlivé na oxidaci, jako slitiny titanu a niklu,
- v místě řezu nezůstává zbytkové napětí,
- lze řezat složité tvary, aniž by nastala nežádoucí deformace,
- nedochází k poškození povrchových úprav, materiál může být nabarvený, broušený, leštěný, nebo chráněn fólií,
- může řezat i velmi složitou geometrii, která je omezena jen velikostí vodního paprsku,
- většinou není nutné předem provádět vyvrtání díry,
- jedno vysokotlaké čerpadlo může najednou napájet více trysek,
- je možné provést řez v různých kvalitách, od nejlepší s drsností okolo Ra 3,2 až po hrubý řez,
- úběr materiálu závisí na mechanických vlastnostech (tvrdost, pevnost) pouze minimálně,
- při řezání se neuvolňuje žádný prach ani plyn,
- stroj lze snadno zařadit do automatizovaného systému výroby.

1.2.6 Nevýhody technologie vodního paprsku

Technologie obrábění vodním paprskem má i své nevýhody, mezi něž patří [5, 7]:

- nelze obrábět materiály, u kterých může při kontaktu s vodou nastat rychlá oxidace, bobtnání nebo rozpouštění materiálu,
- nelze obrábět materiály, u nichž dochází k porušení vnitřního mechanického předpětí (řezání kaleného skla),
- je omezeno zaoblení vnitřních rohů, které závisí na průměru vodního paprsku,
- malé dílce je nutné uchytit (například můstky), aby nedošlo k jejich propadnutí skrz rošt do vany,
- nedokáže splnit vysoké požadavky na přesnost,
- musejí se zvolit vhodné řezací podmínky, v případě nevhodných podmínek nastane výrazné zhoršení řezu, které se projevuje rýhováním,
- při řezání velmi tlustých materiálů dochází na spodní hraně řezu k poměrně velkým nepřesnostem,
- hlučný provoz.

2 PRACOVNÍ ZAŘÍZENÍ PRO ŘEZÁNÍ VODNÍM PAPRSKEM

Zařízení pro řezání vodním paprskem (obr. 2.1) obsahuje mnoho komponent, které slouží k různým činnostem potřebným pro funkci celého stroje. Základem zařízení je ve většině případů upravený CNC stroj, ke kterému jsou přidány komponenty na vytvoření a usměrnění vysokotlakého vodního paprsku. Mezi hlavní komponenty stroje patří tyto části [9]:

- hydraulická jednotka s vysokotlakým hydraulickým čerpadlem, multiplikátorem, akumulátorem, nízkotlakým a vysokotlakým filtrem,
- potrubí na rozvod vysokotlaké vody,
- řezací hlavice s vysokotlakým ventilem, vodní tryskou nebo abrazivní tryskou se směšovací komorou,
- CNC zařízení umožňující pohyb řezací hlavice,
- speciální stůl s vodní vanou a lapačem vody,
- systém zásobování abraziva,
- řídicí systém.



Obr. 2.1 Zařízení pro řezání vodním paprskem série Mach 3 společnosti Flow International Corporation [10].

2.1 Hydraulická jednotka

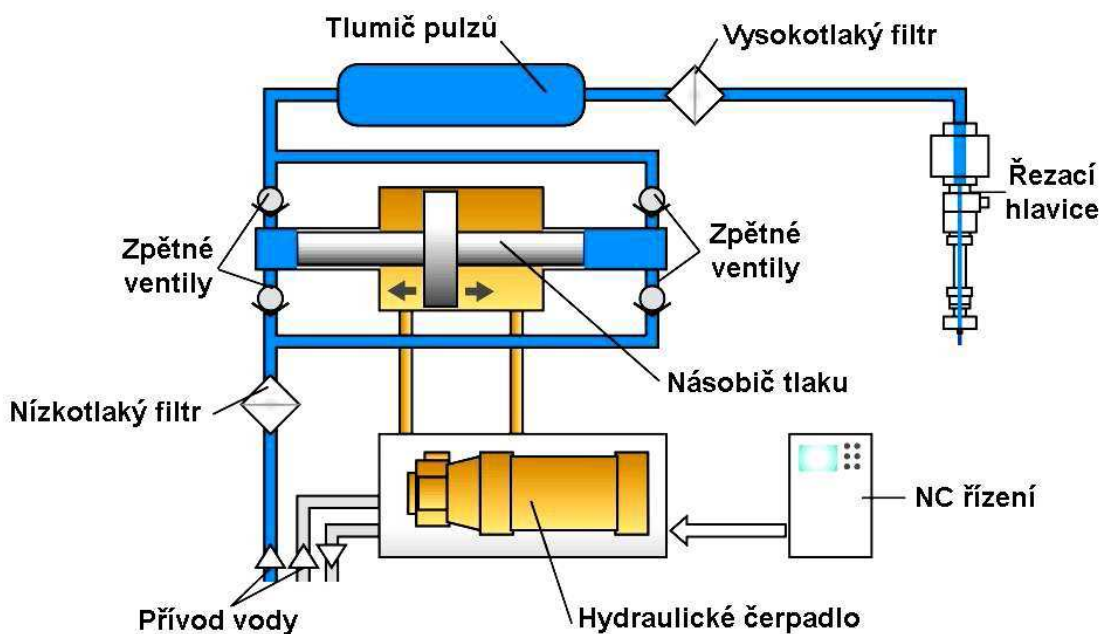
K vyvození vysokého tlaku vody pro obrábění je zapotřebí hydraulické jednotky (obr. 2.2). Tu lze rozdělit do dvou okruhů, a to do primárního olejového a sekundárního vysokotlakého vodního okruhu [9].

- Primární olejový okruh

Primární olejový okruh se skládá z vysokotlakého hydraulického čerpadla, multiplikátoru a olejové nádrže. Hydraulické čerpadlo, které je poháněno pomocí 20 až 150 kW elektromotoru, pohání olej v primárním okruhu, ve kterém se nachází multiplikátor (násobič tlaku). Multiplikátor poté na principu Pascalova zákona přenesení znásobený tlak z primárního okruhu na sekundární.

- Sekundární vysokotlaký vodní okruh

Sekundární vysokotlaký vodní okruh se skládá z multiplikátoru, zpětných ventilů, akumulátoru (tlumiče pulzů), nízkotlakého a vysokotlakého filtru. Voda prochází přes nízkotlaký filtr, kde se odstraní nečistoty a dále se přes zpětné ventily dostává do multiplikátoru, kde se mnohonásobně zvýší její tlak. Tato vysokotlaká voda se poté přemísťuje přes zpětné ventily do akumulátoru, v němž se ztlumí hydraulické rázy a zamezí se kolísání tlaku vyvolané multiplikátorem. Nakonec se voda dostává přes vysokotlaký filtr a potrubí do řezací hlavice.



Obr. 2.2 Hydraulická jednotka [9].

2.1.1 Hydraulické čerpadlo

Vysokotlaké hydraulické čerpadlo (obr. 2.3) je poháněno elektromotorem a generuje tlak oleje v primárním okruhu. Tlak oleje, který je vyvozený čerpadlem, se pohybuje podle typu čerpadla kolem 15 až 25 MPa [7, 9].



Obr. 2.3 Ukázka vysokotlakého hydraulického čerpadla [11].

2.1.2 Multiplikátor

Multiplikátor (obr. 2.4) slouží k převedení tlaku oleje v primárním okruhu na několikanásobně vyšší tlak vody v sekundárním okruhu. Multiplikátor pracuje na principu Pascalova zákona: $p_1 \cdot S_1 = p_2 \cdot S_2$, kde p_1 a S_1 jsou tlak a plocha pístu v primárním a p_2 a S_2 v sekundárním okruhu. Výstupní tlak vody je tedy dán poměrem velikosti pístů multiplikátoru a tlakem oleje přiváděného z hydraulického čerpadla. Poměr velikosti pístů je daný konstrukcí multiplikátoru, který je navržen přibližně na 20násobné zvýšení tlaku. Z toho vyplývá, že regulaci tlaku vysokotlaké vody provádíme změnou tlaku oleje v primárním okruhu. Výstupní tlak vody se pohybuje v rozmezí 380 až 690 MPa. Průtok vody se pohybuje v rozmezí kolem 1,9 až 12,7 l.min⁻¹ [1, 12].



Obr. 2.4 Multiplikátor.

2.1.3 Akumulátor

Akumulátor tlaku (obr. 2.5) se nachází v sekundárním okruhu vysokotlaké vody a je umístěn za multiplikátorem. Akumulátor je vysokotlaká nádoba sloužící k zamezení kolísání tlaku a tlumení hydraulických rázů, které jsou způsobeny multiplikátorem. Toto zařízení nám tedy zajišťuje rovnoměrnou dodávku tlaku, která je zapotřebí pro přesnost řezu a správný chod stroje. Nádoba musí odolávat velmi vysokým tlakům a hydraulickým rázům, proto je upravována autofretáží. Autofretáž spočívá v přetlakování nádoby, při níž dochází k vytvoření plastických deformací. Plastické deformace se vytvářejí zejména na hranicích makro vad, kde dochází ke zpevnění a koncentraci napětí, které tyto vady zaceluje. Tímto způsobem se zabraňuje růstu trhlin, které se mohou vytvořit během neustálého působení vysokého tlaku a hydraulických rázů [5].



Obr. 2.5 Akumulátor tlaku.

2.1.4 Filtry

Filtry jsou další velmi důležitou součástí hydraulické jednotky. Slouží k zachycování nečistot o velikosti 0,5 až 1,2 μm . Chrání jak samotnou hydraulickou jednotku, tak trysku umístěnou v řezací hlavici. Z tohoto důvodu je nutné filtry pravidelně vyměňovat před skončením jejich životnosti. V hydraulické jednotce jsou dva typy filtrů, a to nízkotlaký a vysokotlaký [1].

- Nízkotlaký filtr (obr. 2.6)

Nízkotlaký filtr je umístěn před multiplikátorem. Je to běžně používaný filtr vyrobený z bavlny nebo syntetických vláken.

- **Vysokotlaký filtr (obr. 2.7)**

Vysokotlaký filtr je umístěn za akumulátorem. Z důvodu velmi vysokého tlaku vody je vyroben z kovu, a to ve formě slinutého karbidu nebo mikrosítek.



Obr. 2.6 Nízkotlaký filtr [13].



Obr. 2.7 Vysokotlaký filtr [13].

2.2 Rozvod vysokotlaké vody

Rozvod vysokotlaké vody z hydraulické jednotky do řezací hlavy je zajištěn pomocí vysokotlakých trubek (obr. 2.8) a spojovacích elementů. Tyto prvky jsou většinou normalizované a standardizované a jsou na ně kladeny vysoké požadavky v oblasti těsnosti spojů, korozivzdornosti, odolnosti proti vysokým tlakům a hydraulickým rázům. Vysokotlaké trubky a spojovací elementy jsou vyrobeny z vysokopevnostních korozivzdorných materiálů, mezi něž patří například oceli třídy 17, z nichž je nejvhodnější zejména ocel 17 351. Vnější průměr vysokotlakých potrubí bývá v rozmezí od 6 do 12 mm, přičemž vnitřní průměr je v rozsahu 1 až 4 mm [15].



Obr. 2.8 Vysokotlaké potrubí [14].

2.3 Řezací hlavice

Řezací hlavice (obr. 2.9) je jedna z nejdůležitějších částí celého zařízení. Skládá se z vysokotlakého ventilu a vodní trysky. Pokud se jedná o metodu AWJ, nachází se zde také abrazivní tryska se směšovací komorou. Řezací hlavice se z důvodu rychlé a jednoduché montáže vyrábějí s bajonetovým uzávěrem. Odpadá zde také nutnost kalibrace trysek, z důvodu samostředícího systému uchycení dané konstrukčním řešením hlavice. Aby nedocházelo ke zbytečnému zatěžování řezacího ramena, což by mělo negativní dopad na přesnost řezu, provádí se vypínání a zapínání vysokotlakého paprsku za pomoci lehkého pneumatického vysokotlakého ventilu [15].



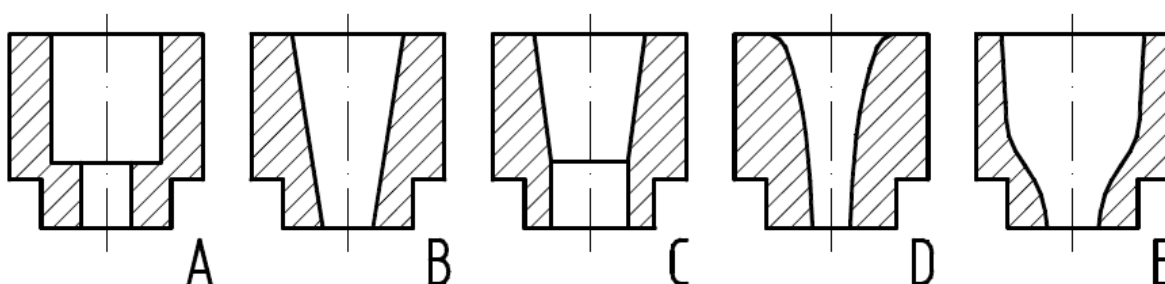
Obr. 2.9 Řezací hlavice [16].

2.3.1 Vodní tryska

Vodní tryska je nejdůležitější součást řezací hlavice. V této trysce se vytváří a formuje vysokotlaký vodní paprsek. Z toho vyplývá, že přesnost a kvalita řezu je dána především vodní tryskou. Na vodní trysku jsou tedy kladeny vysoké požadavky, a to zejména na:

- životnost trysky (daná zejména materiálem, ze kterého je vyrobena),
- přesný geometrický tvar (obr 2.10) a souosost trysky,
- malou drsnost povrchu vnitřní části trysky.

K výrobě vodní trysky se používají velmi tvrdé materiály. Nejčastěji jsou to safír, rubín a syntetický diamant. Životnost safírových a rubínových trysek se pohybuje okolo 200 hodin, poté se z důvodu zanesení nečistotami a vodními usazeninami musejí vyměnit. V současnosti častěji používané, ale dražší diamantové trysky mají až 10 násobně vyšší životnost, která dosahuje až 2000 hodin. Tím se zmenšuje četnost výměny trysky a klesají náklady na údržbu. Diamantové trysky mají také tu výhodu, že se dají opakovaně čistit, přičemž zůstanou zachovány jejich vlastnosti. Toto čištění se pak standardně provádí ultrazvukovou metodou. [15]



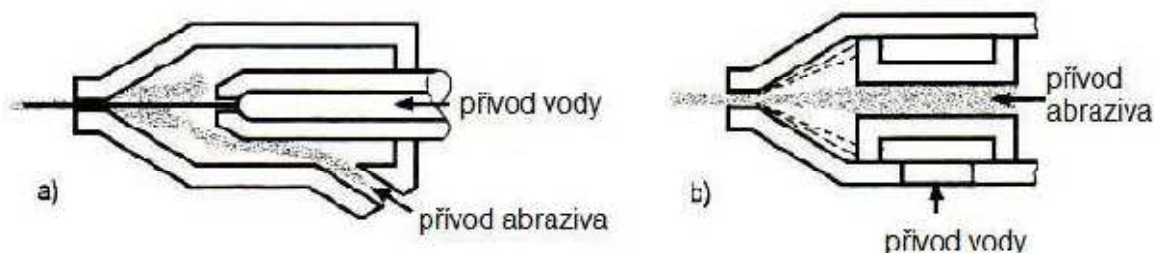
Obr. 2.10 Používané tvary vodních trysek [15].

2.3.2 Abrazivní tryska se směšovací komorou

Abrazivní vodní trysku využíváme při použití metody AWJ, kdy se do vysokotlakého vodního paprsku přidává abrazivo. Je to v podstatě zvláštní typ vodní trysky, ke které je přidána směšovací komora. Metoda přidávání abraziva do vodního paprsku spočívá v principu vzniku podtlaku při přeměně laminárního proudění vody na turbulentní, která nastává při vtékání vody do širšího prostoru směšovací komory. Tyto trysky se dají rozdělit podle způsobu přívodu abraziva do vodního paprsku na dva základní druhy (obr. 2.11), a to na trysky s radiálním a axiálním přívodem abraziva [1, 15].

Trysky s radiálním (bočním) přívodem abraziva jsou snadněji vyrobitelné. Lze u nich vypnout přívod abraziva a využívat pouze čistý paprsek vody. Jejich nevýhodou je však rychlejší opotřebení.

Trysky s axiálním (centrálním) přívodem abraziva mají menší opotřebení oproti tryškám radiálním, což je dáno dokonalejším smíšením abraziva s vodou. Tyto trysky jsou však náročnější na výrobu, což se odráží v jejich ceně.



Obr. 2.11 Tryska s radiálním a) a axiálním b) přívodem abraziva [1].

2.4 Souřadnicový CNC stůl

CNC stůl (obr. 2.12) se skládá ze souřadnicového portálu a pracovního stolu. Zařízení je plně automatizované a využívá CAD/CAM systém.

Portál je řízený počítačem, ve kterém se nachází předem zhotovený řídicí program. Je zpravidla usazený co nejnižše nad stolem, což zaručuje společně se servomotory s bezvůlovou převodovkou a přesným lineárním vedením, vysokou dynamiku zařízení. [18]

Na pracovním stole jsou umístěny vyměnitelné rošty, na které se ukládají obráběné součásti. Samotný stůl se skládá z vany, v níž se často nachází lapač vody. Lapač vody je hluboká nádoba umístěná po celé šířce stolu a pohybuje se současně s řezací hlavou. Slouží k zachycení vodního paprsku, přičemž tlumí hluk, který může dosáhnout hodnot vyšších než 100 dB. Lapač musí být dostatečně hluboký (přibližně 300 až 600 mm), aby vodní paprsek nepoškodil jeho dno. Tato hloubka se však dá redukovat pomocí ocelových kuliček nasypaných na dno nádoby. Rozměr stolu se běžně pohybuje v rozmezích od délky 3000 až 18000 mm a šířky 1500 až 5000 mm. Stoly jsou vyráběny z korozivzdorných materiálů a musí u nich být zajištěna dostatečně tuhá a pevná konstrukce [1, 8, 17].



Obr. 2.12 Souřadnicový CNC stůl [19].

2.5 Abrazivo

Abrazivo se používá při řezání technologií AWJ, kdy se přidává do vodního paprsku v řezací hlavici. Jeho přidáním do vodního paprsku se mnohonásobně zvyšuje produktivita obrábění. Díky abrazivu je též možné obrábět tvrdé materiály, což by čistým vodním paprskem nebylo možné. Druh a množství přiváděného abraziva má velký vliv na rychlost a kvalitu obrábění. Materiálů použitelných jako abrazivo je velká řada, od poměrně levného křemičitého písku až po nákladnější, ale kvalitnější granát a olivín. V potravinářském průmyslu může být využita dokonce i ledová tříšť nebo kakao [7, 8].

Materiály používané jako abrazivo:

- granát,
- olivín,
- korund,
- křemičitý písek,
- ocelová drť,
- ledová tříšť,
- sůl, cukr, kakao.

Druh používaného abraziva ovlivňuje velkou měrou efektivnost a kvalitu obrábění. Pro zvolení jeho správného druhu je tedy nutno vzít v úvahu mnoho faktorů. Mezi ně patří zejména cena, tvrdost, zrnitost, recyklovatelnost, zdravotní a ekologická nezávadnost [1, 20, 21].

Cena abraziva

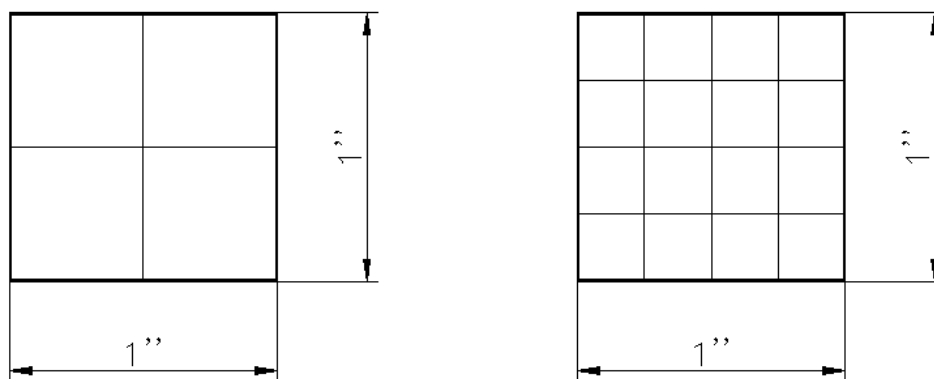
Velice důležitým faktorem při výběru vhodného abraziva je jeho cena, jelikož její podíl činí až 50 % z celkových provozních nákladů. Obecně lze říci, že čím dražší je abrazivo, tím kvalitnější je řez. Proto je vhodné volit rozumný poměr mezi kvalitou a cenou. Například při hrubém dělení, kde není zapotřebí příliš kvalitní řez, není rozumné použít drahé abrazivo.

Tvrdost abraziva

Tvrdý abrazivní materiál zaručuje vyšší produktivitu obrábění a umožňuje obrábět i pevnější a tvrdší materiály. Při zvolení velmi tvrdého abraziva je však nutno počítat s větším opotřebením abrazivní trysky.

Zrnitost abraziva

Zrnitost, která má výrazný vliv na rychlost a kvalitu řezu, udává, jakou velikost mají částice daného abraziva. Čím je abrazivo jemnější, tím je řez kvalitnější, ale pomalejší. Zrnitost se udává v jednotkách mesh. Jednotka mesh se dá vyjádřit jako počet ok fiktivního síta o velikosti $1 \times 1''$, kterým ještě propadne příslušné abrazivo (obr. 2.13). Standardně se používá zrnitost okolo 80 až 120 mesh (průměr velikosti zrna od 125 do 180 μm).



Obr. 2.13 Fiktivní síto mesh (vlevo 4 mesh, vpravo 16 mesh).

Zdravotní a ekologická nezávadnost

Abrazivní materiály by měli splňovat požadavky na zdravotní a ekologickou nezávadnost. Není například vhodné používat jako abrazivo křemičitý písek, který ucpává plíce a způsobuje silikózu. Abrazivní materiály jsou ekologicky nezávadné, je však vhodné, aby bylo abrazivo recyklovatelné. V porovnání s jinými paprskovými technologiemi (laser, plazma) je technologie vodního paprsku velmi šetrná k životnímu prostředí.

Recyklovatelnost

Částice abrazivního materiálu mají strukturu, která umožňuje, že při sražení staré řezné hrany dochází k vytvoření několika hran nových. Této skutečnosti se využívá při recyklaci. Recyklované abrazivo se dá znovu zavést do výroby, aniž by došlo k výrazné degradaci jeho vlastností.

Nejčastěji používaná abraziva

Nejčastěji používaná abraziva jsou zelený olivín, australský granát a indický granát. Tyto materiály mají vysoký abrazivní účinek a jsou zdravotně nezávadné. V praxi je z důvodu vyššího abrazivního účinku více používán granát než olivín, je však dražší a rychleji opotřebí abrazivní trysku. Jeho další nevýhodou je i jeho nevhodnost k recyklaci [7, 8].

3 ROZBOR TECHNOLOGICKÝCH MOŽNOSTÍ VODNÍHO PAPRSKU

Tato kapitola je zaměřena na technologické možnosti vodního paprsku. Její první část se zabývá metodami dělení materiálu, kde technologie vodního paprsku nachází největší uplatnění. Poté se zaměřuje na další využití vodního paprsku, který se dá použít i při soustružení, frézování, gravírování a vrtání. V neposlední řadě se tato kapitola zabývá využitím vodního paprsku v různých odvětvích průmyslu.

3.1 Technologie dělení vodním paprskem

Tato podkapitola se věnuje rozdělení a popisu jednotlivých technologií dělení vodním paprskem. Mezi tyto technologie patří:

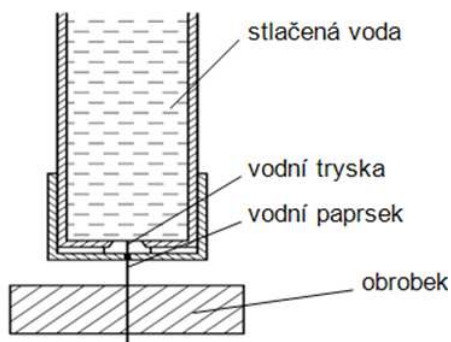
- metoda WJM – Water Jet Machining,
- metoda AWJ – Abrasive Water Jet,
- metoda ASJ – Abrasive Slurry Jet ,
- metoda IJM – Ice Jet Machining,
- metoda DWJ – Dynamic Water Jet,
- metoda MWJ – Micro Water Jet,
- metoda LMJ – Laser Micro Jet.

3.1.1 WJM – Water Jet Machining

Jedná se o nejstarší metodu dělení vodním paprskem, z níž byly odvozeny všechny ostatní metody této technologie (obr. 3.1). Do vodního paprsku se nepřidává žádné abrazivo, což má za následek nižší produktivitu v porovnání s jinými vyspělejšími metodami (AWJ, ASJ apod.). Touto metodou se též dají řezat jen měkké materiály jako například plasty a dřevo [8].

Parametry metody WJM:

- pracovní tlak vody: až 600 MPa,
- rychlost proudění vodního paprsku: 600 až 900 m.s⁻¹,
- průměr trysky: 0,1 až 0,25 mm,
- šířka paprsku: 0,1 až 1,5 mm,
- tloušťka děleného materiálu: až 100 mm.



Obr. 3.1 Schematické znázornění metody WJM [1].

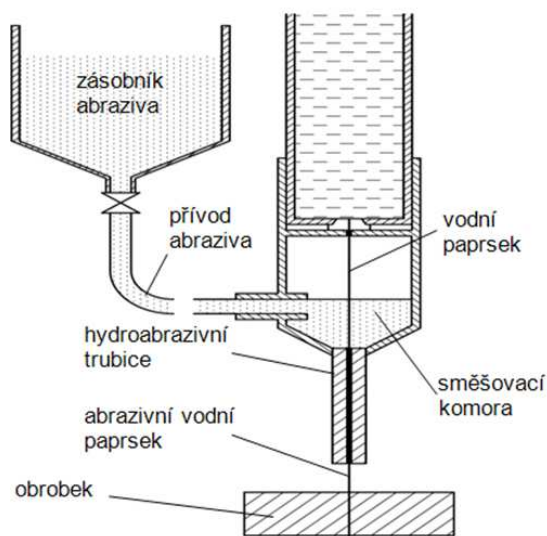
3.1.2 AWJ – Abrasive Water Jet

Jedná se o metodu, při níž je do vodního paprsku přidáváno abrazivo. Abrazivo se nachází v zásobníku, odkud je přesně dávkováno do směšovací komory. Ve směšovací komoře je poté strhnuto proudem vodního paprsku (obr. 3.2).

Oproti WJM je tato metoda mnohem produktivnější a dají se jí řezat i tvrdé materiály jako kovy, keramiky a kompozity. Tato metoda též dovede řezat materiály větších tloušťek. Menší nevýhodou oproti metodě WJM může být větší průměr trysky, tudíž i větší šířka vodního paprsku [8,24].

Parametry metody AWJ:

- pracovní tlak vody: až 600 MPa,
- rychlost proudění vodního paprsku: 600 až 900 m.s⁻¹,
- průměr trysky: 0,8 až 2 mm,
- šířka paprsku: 1,2 až 2 mm,
- tloušťka děleného materiálu: až 250 mm.



Obr. 3.2 Schematické znázornění metody AWJ [1].

3.1.3 ASJ – Abrasive Slurry Jet

Jedná se o metodu s přímým vstřikováním abraziva. Stejně jako u technologie AWJ jde tedy o metodu, při níž je využíván vysokotlaký abrazivní paprsek. Avšak na rozdíl od technologie AWJ není abrazivo přidáváno do vodního paprsku ve směšovací komoře.

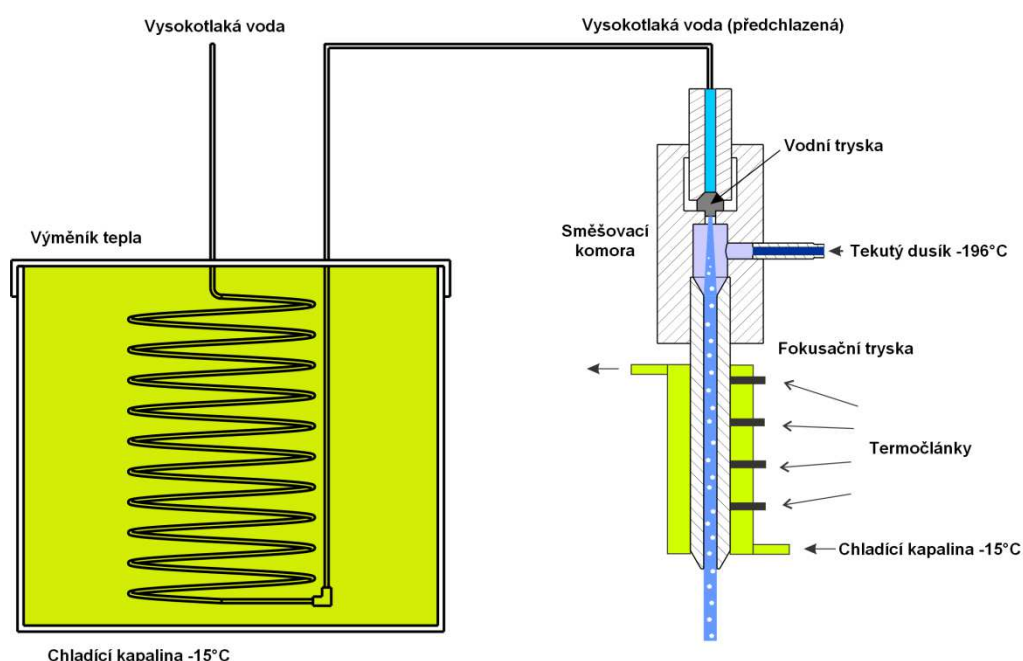
Abrazivo je u metody ASJ již součástí suspenze smíchané s vodou, která se nachází v tlakové nádobě. Z této nádoby odchází pod tlakem 100 MPa přímo do trysky. Díky skutečnosti, že se do trysky přivádí voda s již přidaným abrazivem, může být velikost trysky menší a šířka vodního paprsku užší [1].

3.1.4 IJM – Ice Jet Machining

Jedná se o metodu pracující s abrazivem ve formě ledových krystalků. Oproti technologii AWJ (kde se používá abrazivo jako granát nebo olivín) nemá metoda IJM (ledové krystalky) tak tvrdé abrazivo, což se odráží v menší účinnosti. Avšak oproti metodě AWJ má tato technologie řadu výhod.

Obrovskou výhodou této metody je velké snížení nákladů na brusivo. U technologie AWJ činí náklady na brusivo až 50 % z celkových provozních nákladů. Oproti tomu si metoda IJM vytváří brusivo sama ve formě ledových krystalů (obr. 3.3). Metoda IJM je též vysoce ekologická, jelikož při ní nevzniká žádný odpad ve formě již nerecyklovatelného abraziva.

Díky svým vlastnostem a nezávadnosti ledové tříště při řezání potravin je technologie IJM vhodná především pro potravinářský průmysl [1].



Obr. 3.3 Schematické znázornění metody IJM [22].

3.1.5 DWJ – Dynamic Water Jet

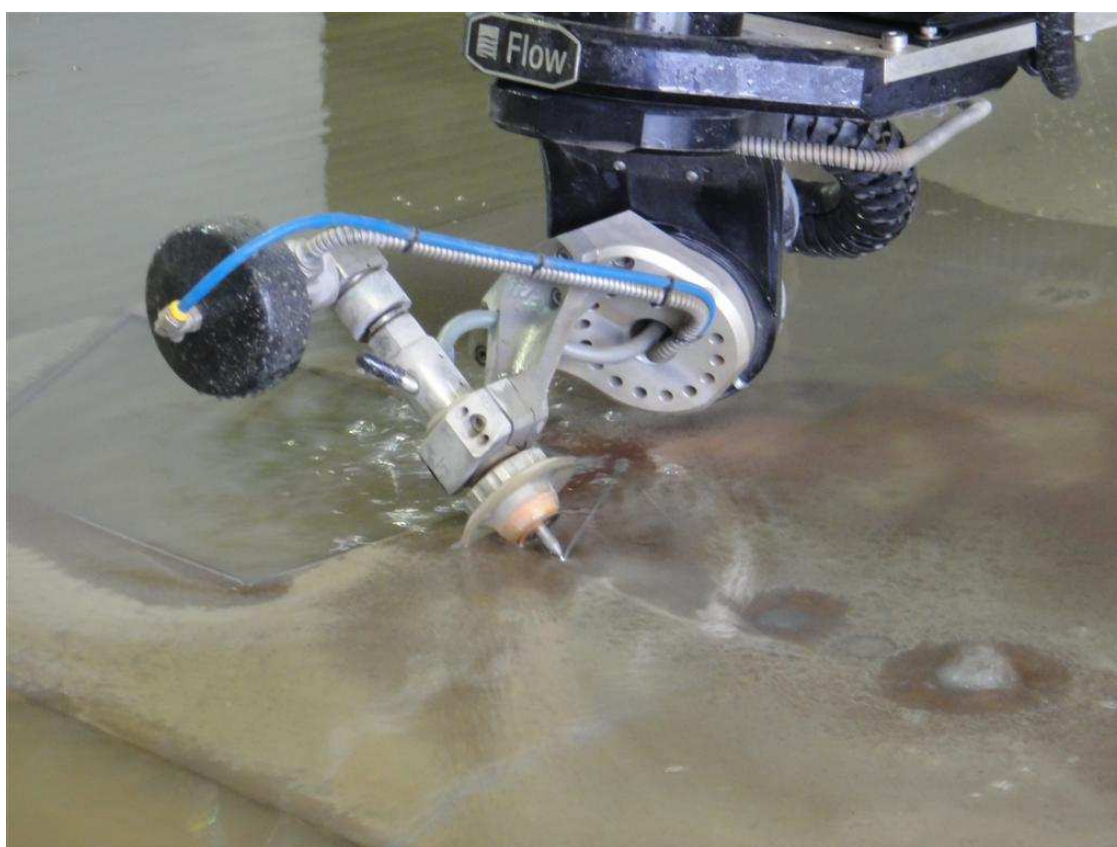
Jedná se o pokročilejší technologii řezání vodním paprskem. Tato metoda využívá vyššího tlaku vysokotlakého paprsku a naklánění řezací hlavy, což umožňuje řezání v libovolných úhlech. (obr. 3.4)

Řezací hlavy se nachází na kloubové hlavici, čímž je jí umožněno naklánět se ve všech možných směrech. Naklánění řezací hlavy je řízeno speciálním matematickým modelem a napomáhá minimalizaci nežádoucích jevů, které vznikají při řezu, jako jsou ohýbání paprsku a tvorba úkosů.

Při použití běžné technologie, která neumožňuje natáčení hlavy, se paprsek v místě řezu ohýbá, což je přirozený jev. Tento jev se běžně minimalizuje snížením rychlosti posuvu řezací hlavy, čímž se snižuje výrobní produktivita. Technologie DWJ však dokáže naklonit řezací hlavici do potřebného úhlu tak, aby se minimalizovalo ohýbání paprsku bez snížení velikosti posuvu.

Další velkou výhodou této technologie je zabránění tvoření úkosů, jejichž vznik se dá velice dobře kompenzovat nakloněním řezací hlavy.

Vyšší tlak vodního paprsku technologie DWJ umožňuje řezat materiály vyšší rychlostí. Rychlost řezu u této metody bývá větší než u běžné technologie AWJ. Dalšími výhodami použití vyššího tlaku jsou snížení spotřeby abraziva a zvýšení kvality řezu [24].



Obr. 3.4 Nakláněcí řezací hlavy [23].

3.1.6 MWJ – Micro Water Jet

Jedná se o pokročilou technologii řezání vodním paprskem, která využívá vodní trysku o velmi malém průměru. Velikost průměru vodního paprsku, tedy i šířky řezu, dosahuje až 0,08 mm. Při použití abraziva je průměr vodního paprsku větší, přibližně 0,2 mm. Při této metodě je však nutné použít jemné abrazivo. Pracovní zařízení této technologie musí zaručovat velmi přesné polohování v rozmezí $\pm 0,003$ mm.

MWJ dosahuje přesnosti $\pm 0,01$ mm, což je desetinásobně větší přesnost než u konvenčních metod řezání vodním paprskem. Tato metoda nabízí stejnou přesnost, která by se dala očekávat od vyspělých laserových technologií, nebo EDM řezání drátem [30].

MWJ nachází uplatnění především v:

- medicíně (řezání biokompatibilních materiálů se složitými obrysy a malými tolerancemi),
- elektrotechnickém průmyslu (řezání silikonu, slídy, grafitu, mědi, bimetalických a izolačních materiálů bez změny jejich vlastností),
- hodinářském průmyslu (řezání drobných součástí vyrobených z pevných, oděruvzdorných materiálů (obr. 3.5)).



Obr. 3.5 Drobné součásti zhotovené technologií MWJ [30].

3.1.7 LMJ – Laser Micro Jet

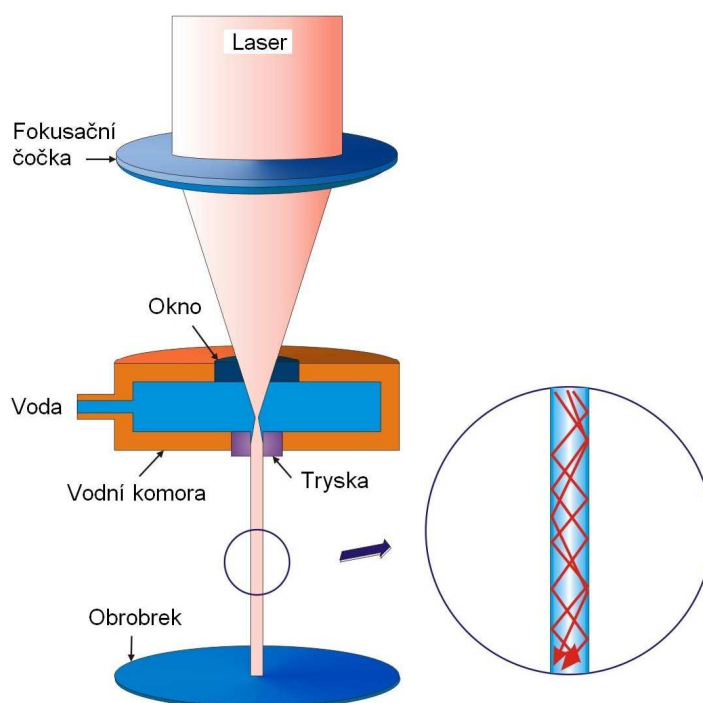
Laser Micro Jet představuje revoluční metodu v oblasti nekonvenčních technologií, jelikož jako první vznikla sloučením dvou zcela odlišných nekonvenčních metod, metod řezání laserovým a vodním paprskem.

Princip této technologie spočívá ve spojení vodního a laserového paprsku. Z vodní trysky o velmi malém průměru v rozmezí 25 až 100 μm pod (pro metodu vodního paprsku) poměrně malým tlakem v rozsahu 2 až 50 MPa vychází tenký paprsek vody. Laserový paprsek je zaměřen optikou přímo do vodního paprsku, jenž pro něj tvoří optické vlákno, které ho vede přímo k místu řezu (obr. 3.6).

Vodní paprsek plní úlohu nejen optického vlákna, ale také chladí místo řezu a odvádí odtavený materiál [34].

Mezi výhody technologie LMJ patří:

- vysoká rychlost řezání,
- možnost řezat i velmi tvrdé materiály,
- rovný, hladký a úzký řez,
- žádné znečištění či zdeformování řezné hrany,
- chlazení obrobku během řezu,
- nízké provozní náklady,
- šetrnost k životnímu prostředí.



Obr. 3.6 Schematické znázornění metody LMJ [34].

3.2 Technologie soustružení vodním paprskem

Technologie soustružení vodním paprskem nalézá uplatnění především při obrábění těžkoobrobitelných materiálů, jako jsou například kámen, vysokopevnostní slitiny a keramické materiály. (obr. 3.7)

Při soustružení vykonává obrobek rotační pohyb. Abrazivní vodní paprsek vykonává translační pohyb v axiálním a radiálním směru vzhledem k ose rotace obrobku. Přičemž axiální pohyb obrobku zajišťuje posuv a radiální pohyb určuje velikost hloubky řezu [1].



Obr. 3.7 Soustružení vodním paprskem [25].

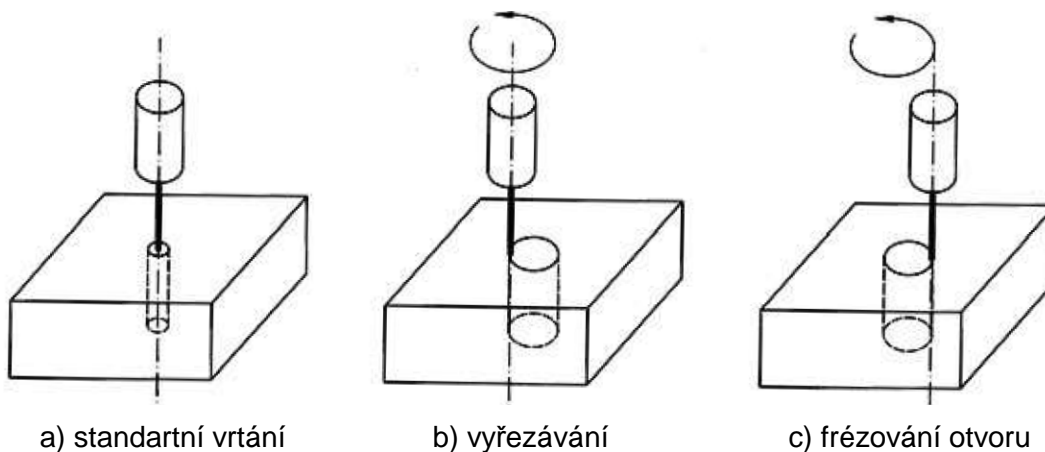
3.3 Technologie vrtání vodním paprskem

Technologie vrtání vodním paprskem je velmi perspektivní metodou. Využití nachází hlavně při vrtání těžkoobrobitelných materiálů, jako jsou sklo, keramika a niklové superslitiny.

V současnosti je vyvinuto mnoho metod vrtání otvorů. Tyto metody jsou charakterizovány vzájemným pohybem vodního paprsku a obrobku [1].

Nejčastěji používané způsoby vrtání jsou (obr. 3.8):

- vrtání se stacionárním vodním paprskem a obrobkem (standartní vrtání),
- vrtání s vibrujícím vodním paprskem a stacionárním obrobkem (vyřezávání středu otvoru),
- vrtání s rotujícím vodním paprskem a stacionárním obrobkem (frézování otvoru).



a) standartní vrtání

b) vyřezávání

c) frézování otvoru

Obr. 3.8 Způsoby vrtání vodním paprskem [1].

3.4 Technologie frézování vodním paprskem

Technologie frézování vodním paprskem se využívá při obrábění tvarově složitých obrobků, jako jsou například licí formy. Tato technologie se dá také vhodně aplikovat při výrobě tvářecích nástrojů. Další uplatnění tato metoda nachází při frézování těžkoobrobitelných materiálů.

Při frézování dochází k řezání materiálu, avšak nedochází k jeho dělení. Během frézování paprsek vysokotlaké vody opakovaně přechází po obráběné ploše, čímž postupně odebírá materiál obrobku [1, 26].

3.5 Technologie gravírování vodním paprskem

Technologie gravírování vodním paprskem je velmi podobná metodě frézování. Gravírování spočívá v odstraňování povrchové vrstvy do požadované hloubky. Změny hloubky se dosahuje průběžnou změnou dvou parametrů. Těmito parametry jsou velikost posuvu a vzdálenost trysky od obráběného materiálu. Přičemž při zvyšování posuvu a vzdálenosti trysky se hloubka řezu zmenšuje. O tyto průběžné změny parametrů se stará nastavbový program, který je ve většině případů dodáván již při nákupu stroje.

Co se týče tvarů, je zde omezení v minimálním zaoblení vnitřních rohů dané průměrem vodního paprsku. Při gravírování měkkých a tenkých materiálů, kde k řezání není třeba použít abrazivo, bývá průměr paprsku kolem 0,2 mm. Avšak pro tvrdé a silné materiály je abrazivo již používáno, čímž se zvyšuje průměr paprsku na rozměry od 0,5 do 2,5 mm.

Metoda gravírování se uplatňuje především v oblasti umění (obr. 3.9). Technologie gravírování vodním paprskem začíná konkurovat doposud využívaným metodám, jako jsou mechanické rytí a nekonvenční laserové gravírování. Podstata technologie vodního paprsku totiž umožňuje obrábět téměř všechny typy materiálů. Vodním paprskem se proto dají bez problémů gravírovat i materiály, jako keramika či sklo [26].



Obr. 3.9 Gravírování vodním paprskem (drobné detaily dokončeny ručním broušením) [26].

3.6 Využití vodního paprsku v průmyslu

Technologie vodního paprsku nachází díky svým výhodám uplatnění v mnoha odvětvích průmyslu. Mezi její největší výhody patří možnost obrábět téměř jakýkoliv materiál a skutečnost, že při obrábění nevzniká téměř žádná tepelně ani deformačně ovlivněná oblast.

Vodní paprsek nachází uplatnění zejména ve:

- strojírenském průmyslu,
- stavebním průmyslu,
- automobilovém průmyslu,
- leteckém průmyslu,
- kosmickém průmyslu,
- potravinářském průmyslu,
- sklářském průmyslu,
- papírenském průmyslu.

3.6.1 Využití vodního paprsku ve strojírenském průmyslu

Ve strojírenském průmyslu má technologie vodního paprsku nejširší využití. Největší uplatnění nachází především při dělení a tvarovém vyřezávání různých materiálů s různými mechanickými vlastnostmi od gumy až po keramiku. Další využití nachází také v jiných technologiích, jako jsou soustružení, vrtání, frézování a otryskávání.

3.6.2 Využití vodního paprsku ve stavebním průmyslu

Ve stavebním průmyslu nachází technologie vodního paprsku uplatnění například při odkrývání železobetonových konstrukcí, sanaci zdiva nebo odstraňování nátěrů.

Například při sanaci zdiva má technologie vodního paprsku velké výhody oproti konvenčním bouracím zařízením, jako jsou například pneumatická kladiva. Mezi tyto výhody patří fakt, že při sanaci nevzniká prach. Další předností je také potlačení vibrací, které by mohly poškodit statiku stavby.

3.6.3 Využití vodního paprsku v automobilovém průmyslu

V automobilovém průmyslu se technologie vodního paprsku využívá při řezání celé řady komponent pro interiér a exteriér vozidla, jako jsou stropní potahy, koberečky, zvukotěsné materiály, přístrojové a dveřní panely, boční lišty, skla a těsnění oken. Řezací hlavice zde bývají ve většině případů umístěné na, v automobilovém průmyslu hojně používaných, robotických ramenech (obr. 3.10) [27, 28].



Obr. 3.10 Využití robotického ramena při řezání vodním paprskem [28].

3.6.4 Využití vodního paprsku v leteckém a kosmickém průmyslu

V leteckém a kosmickém průmyslu nachází technologie vodního paprsku velké uplatnění. Využívá se zde při řezání těžkoobrobitelných materiálů, jako jsou kompozity a keramika. Další uplatnění nachází při řezání komponentů, jež nesmějí být tepelně ani deformačně ovlivněné během obrábění.

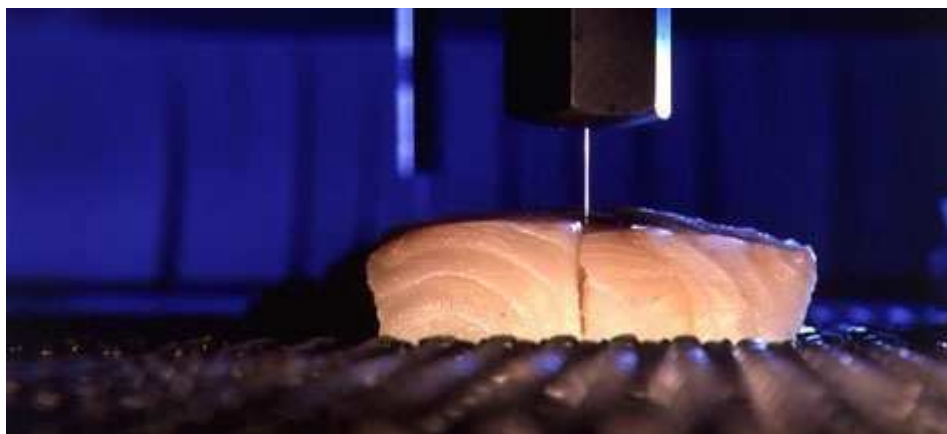
Zejména v kosmickém průmyslu je technologie vodního paprsku téměř nenahraditelná. Uplatnění zde nachází při řezání keramických destiček upevněných na tepelném štítu kosmické lodi (obr. 3.11). Při řezání keramických destiček totiž nesmí docházet k jejich tepelnému ovlivnění, které by poté mohlo způsobit vznik mikrotrhlin. Takovéto řezání keramiky je možné právě jen technologií vodního paprsku [27, 29].



Obr. 3.11 Tepelný štít na spodní straně raketoplánu zhotovený z keramických destiček [29].

3.6.5 Využití vodního paprsku v potravinářském průmyslu

V potravinářském průmyslu je technologie vodního paprsku používána již mnoho let. Využívá se zde k řezání mraženého masa, ryb, pečiva, oplatek, nebo brambor při výrobě hranolků (obr. 3.12). Řez je kvalitní a především hygienický, jelikož je během řezu potravina v kontaktu pouze s vodou [32].



Obr. 3.12 Využití vodního paprsku při řezání potravin [33].

4 TECHNOLOGICKÉ PARAMETRY A KVALITA ŘEZU VODNÍHO PAPRSKU

První část této kapitoly definuje a rozděluje technologické parametry vodního paprsku, jejichž správná volba má výrazný vliv na kvalitu a ekonomičnost řezu. Druhá část kapitoly se zabývá kvalitou řezu, strukturou povrchu a vadami, jež vznikají při použití této technologie.

4.1 Technologické parametry

Technologické parametry jsou parametry, které větší či menší měrou ovlivňují průběh a výsledek obrábění. Jejich správná volba je velice důležitá, neboť určuje efektivnost, ekonomičnost a kvalitu řezu dané technologie.

Jako nejdůležitější parametry se u technologie vodního paprsku uvádějí rychlost posuvu řezací hlavy, hmotnostní tok abraziva a tlak vodního paprsku. Průběh a výsledek obrábění však ovlivňují také jiné parametry [20].

Technologické parametry vodního paprsku lze rozdělit na:

- hydraulické parametry,
- abrazivní parametry,
- směšovací parametry,
- parametry, které přímo souvisejí s procesem obrábění.

4.1.1 Hydraulické parametry

Hydraulické parametry určují hydraulický výkon zařízení. Náleží sem parametry jako [18]:

- tlak čerpadla [MPa],
- tlak vodního paprsku [MPa],
- rychlost proudění vodního paprsku [m.s^{-1}],
- průměr vodní trysky [mm].

4.1.2 Abrazivní parametry

Abrazivní parametry zahrnují vlastnosti a množství používaného brusiva přidávaného do vysokotlakého vodního paprsku. Volba brusiva je závislá především na mechanických vlastnostech obráběného materiálu, jako je tvrdost a pevnost. Jedná se o parametry jako [20]:

- hmotnostní tok abraziva [kg.min^{-1}],
- velikost abrazivních částic (zrnitost) [mesh],
- tvrdost abraziva [N.mm^{-2}],
- tvar abraziva.

4.1.3 Směšovací parametry

Směšovací parametry berou v úvahu parametry abrazivní trysky a způsob přívodu abraziva do vysokotlakého vodního paprsku ve směšovací komoře (například radiální či axiální přívod abraziva). Jedná se o tyto parametry [1, 20]:

- způsob přívodu abraziva,
- průměr abrazivní trysky [mm],
- délka abrazivní trysky [mm].

4.1.4 Parametry, které přímo souvisejí s procesem obrábění

Jedná se o parametry, které jsou určené obráběným materiálem a pohybem řezací hlavice, v některých případech dokonce i pohybem obráběného materiálu. Jsou to parametry jako [20]:

- druh obráběného materiálu,
- tloušťka obráběného materiálu [mm],
- rychlost posuvu řezací hlavice [mm.min⁻¹],
- vzdálenost trysky od obráběného materiálu (zdvih) [mm],
- úhel působení vodního paprsku (naklonění řezací hlavice) [°],
- počet přechodů vodního paprsku nad obráběnou plochou (využívá se především u frézování vodním paprskem),
- počet otáček obrobku (využívá se u soustružení vodním paprskem) [min⁻¹].

4.2 Řezná a deformační zóna dělicího řezu

Při řezání vodním paprskem lze rozeznat na povrchu řezné hrany dvě zóny, a to řeznou (hladkou) a nežádanou deformační (rýhovanou) zónu (obr. 4.1). Deformační zóna vzniká z důvodu ztráty kinetické energie vysokotlakého vodního paprsku, kdy dochází k jeho vychylování. Ke ztrátě kinetické energie dochází především při dělení materiálů větších tlouštěk, může k ní však dojít i při špatné volbě technologických parametrů, a to zejména nízkém tlaku vodního paprsku.

Mohamed Hashish, jenž jako první experimentoval s přidáváním abraziva do vodního paprsku, zformuloval vztahy na zjištění velikosti hloubky řezné a deformační zóny, které se dají zjistit za pomoci koeficientů (zohledňujících především typ řezaného materiálu) a technologických parametrů řezu [36].

Výpočet hloubky řezné zóny h_c :

$$h_c = \frac{\frac{v_a}{C_k} d_a}{\left(\frac{\pi \rho_p d_a^2}{14 m_a}\right)^{\frac{2}{5}} + \frac{v_c}{C_k}} \quad (4.1)$$

Výpočet hloubky deformační zóny h_d :

$$h_d = \frac{1}{\frac{\pi d_a \sigma_{kl} v_p}{2 C_l m_a (v_a - v_c)^2} + \frac{C_f}{d_a} \frac{v_a}{(v_a - v_c)}} \quad (4.2)$$

kde: v_a [m.s⁻¹] - rychlost pohybu částic abraziva,
 C_k [-] - koeficient charakteristické rychlosti,
 d_a [m] - průměr abrazivní trysky,
 ρ_p [kg.m⁻³] - hustota materiálu abraziva,
 m_a [kg.s⁻¹] - hmotnostní tok abraziva,
 v_c [m.s⁻¹] - kritická rychlost částic abraziva,
 σ_{kl} [MPa] - mez kluzu řezaného materiálu,
 v_p [m.s⁻¹] - rychlost posuvu řezací hlavy,
 C_l [-] - koeficient druhu řezaného materiálu,
 C_f [-] - koeficient odporu stěny materiálu.



Obr. 4.1 Řezná (hladká) a deformační (rýhovaná) zóna dělicího řezu [35].

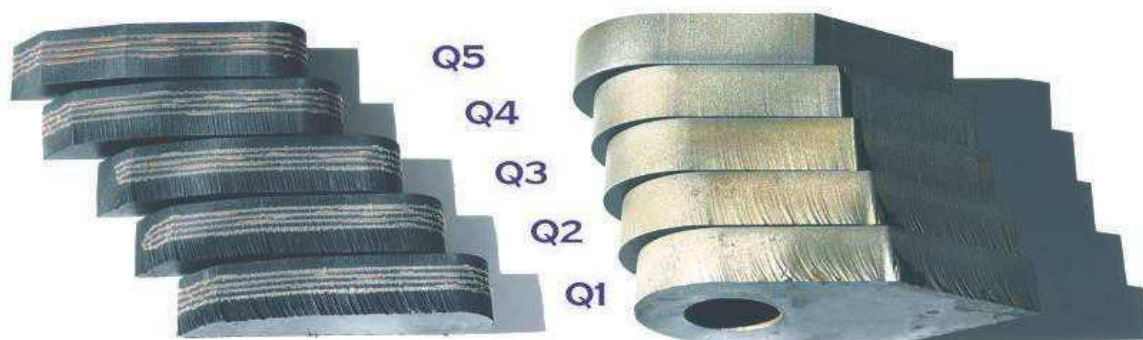
4.3 Kvalita povrchu řezu

Kvalitu neboli jakost obrobeného povrchu lze posuzovat dle tří základních hledisek:

- přesnosti rozměru a tvaru,
- drsnosti a mikrostruktury,
- vlastnosti povrchové vrstvy.

Běžně používané technologie vodního paprsku dosahují přesnosti řezu $\pm 0,2$ až $\pm 0,1$ mm a drsnosti obrobeného povrchu Ra 6,3 až 3,2. Jelikož při řezání vodním paprskem nedochází téměř k žádnému tepelnému ani deformačnímu ovlivnění, zůstávají vlastnosti povrchové vrstvy stejné, nebo se mění jen velmi málo [20, 37].

Kvalita povrchu řezu se při řezání vodním paprskem běžně dělí do pěti skupin Q1 až Q5 (tab. 4.1), kde Q5 představuje nejvyšší a Q1 nejnižší kvalitu řezu (obr. 4.2).



Obr. 4.2 Stupně kvality řezu [37].

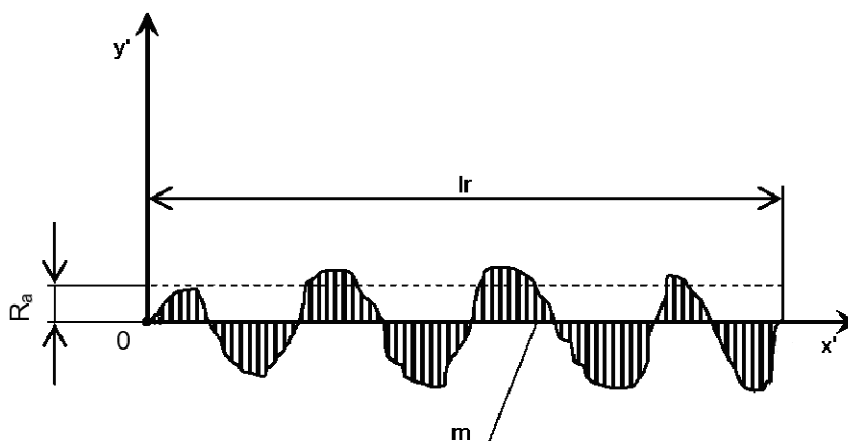
Tab. 4.1 Stupně kvality řezu [37].

| Stupeň kvality řezu | Základní charakteristika | Ra v horní kontuře [μm] | Ra ve spodní kontuře [μm] | Tvarová přesnost v horní kontuře [mm] | Tvarová přesnost ve spodní kontuře [mm] | Úkos |
|---------------------|--------------------------|----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|---|-----------|
| Q5 | Nejlepší řez | pod 3,2 | cca 3,2 | $\pm 0,1$ | $\pm 0,1$ | minimální |
| Q4 | Kvalitní řez | cca 3,2 | cca 6,3 | $\pm 0,1$ | $\pm 0,2$ | mírný |
| Q3 | Střední řez | cca 4,0 | do 12,5 | $\pm 0,15$ | dle mat. | dle mat. |
| Q2 | Hrubý řez | cca 4,0 | do 25 | $\pm 0,2$ | dle mat. | dle mat. |
| Q1 | Dělicí řez | 4,0 – 6,3 | do 40 | $\pm 0,2$ | nepřesné | výrazný |

Pozn.: hodnoty v tabulce jsou orientační a mohou se lišit dle tloušťky a typu řezaného materiálu

4.4 Hodnocení struktury povrchu

Kvalita povrchu obrobeneé plochy se často kvantifikuje parametry struktury povrchu (drsností), která se dá popsat celou řadou parametrů, jako jsou R_a , R_z , R_p , R_v , R_c , R_y a další. V praxi nejčastěji používaný parametr kvality povrchu je však průměrná aritmetická úchylka profilu R_a (obr 4.3).



Obr. 4.3 Průměrná aritmetická úchylka profilu

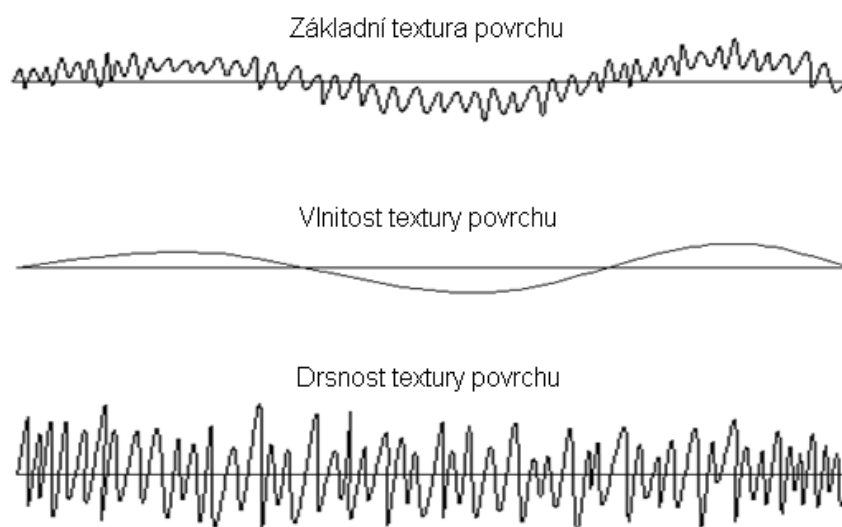
Průměrná aritmetická úchylka profilu R_a je definovaná vztahem [20]:

$$Ra = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |y'(x')| dx \quad (4.3)$$

kde: l_r [mm] - relativní délka profilu,
 $y'(x')$ [-] - funkce popisující profil povrchu.

Na plochách vytvořených technologií vodního paprsku vzniká typická textura, která se dá obecně popsat dvěma parametry (obr. 4.4) [20]:

- parametrem vlnitosti textury povrchu W (což je profil, který je charakterizován vysokými amplitudami a nízkými frekvencemi nerovností povrchu),
- parametrem drsnosti textury povrchu R_a (což je profil, který je charakterizován nízkými amplitudami a vysokými frekvencemi nerovností povrchu).



Obr. 4.4 Vlnitost a drsnost textury povrchu.

4.5 Vady řezu

Tato podkapitola se zabývá vadami řezu, které vznikají při použití technologie vodního paprsku.

Po výstupu vysokotlakého vodního paprsku z vodní trysky dochází k prudkému uvolnění nahromaděné energie do okolního prostředí. Původně soudržný paprsek vody se rozpadá a ztrácí svůj původní tvar i kinetickou energii. To má za následek vznik řady vad, mezi které patří:

- rýhy,
- odchylka kolmosti (úkos),
- neúplný konec řezu (nos),
- povrchové vady.

4.5.1 Rýhy

Vznik rýh na povrchu řezané plochy je typický pro všechny nekonvenční paprskové technologie, jako jsou vodní paprsek, laser či plazma. Na povrchu plochy vytvořené technologií vodního paprsku lze rozeznat dvě zóny řezu, a to horní hladkou a spodní rýhovanou, která vzniká důsledkem ztráty kinetické energie vodního paprsku (viz podkapitola 4.3) [36].

4.5.2 Odchylka kolmosti

Odchylka kolmosti neboli úkos je pro technologie řezání velmi důležitý ukazatel, neboť při velké odchylce kolmosti je ve většině případů nutné řeznou hranu znovu opracovat. Tím se zvýší výrobní čas a zmenší využití materiálu, což může velice prodražit celý výrobní proces. Proto je při řezání nutné tyto odchylky co nejvíce eliminovat.

Odchylku kolmosti lze při řezání technologií vodního paprsku eliminovat těmito způsoby:

- snížením rychlosti posuvu řezací hlavy,
- nakloněním řezací hlavy,
- použitím kvalitnějšího abraziva,
- použitím vodní trysky menšího průměru.

Odchylka kolmosti je způsobena zúžením nebo rozšířením řezné mezery vzniklé rozpadem soudržnosti řezacího paprsku. U technologie vodního paprsku je druh a velikost této odchylky ovlivněn zejména posuvovou rychlostí řezací hlavy, tvrdostí a tloušťkou řezaného materiálu [36].

Při řezání vodním paprskem mohou nastat tyto 4 základní stavy (obr. 4.5):

1.) vznikne obrácená odchylka kolmosti

- nastane při velmi pomalé posuvové rychlosti, nebo při řezu měkkých materiálů,
- vodní paprsek zde stihne probrousit svou přirozenou kuželovitou stopu.

2.) nevznikne odchylka kolmosti

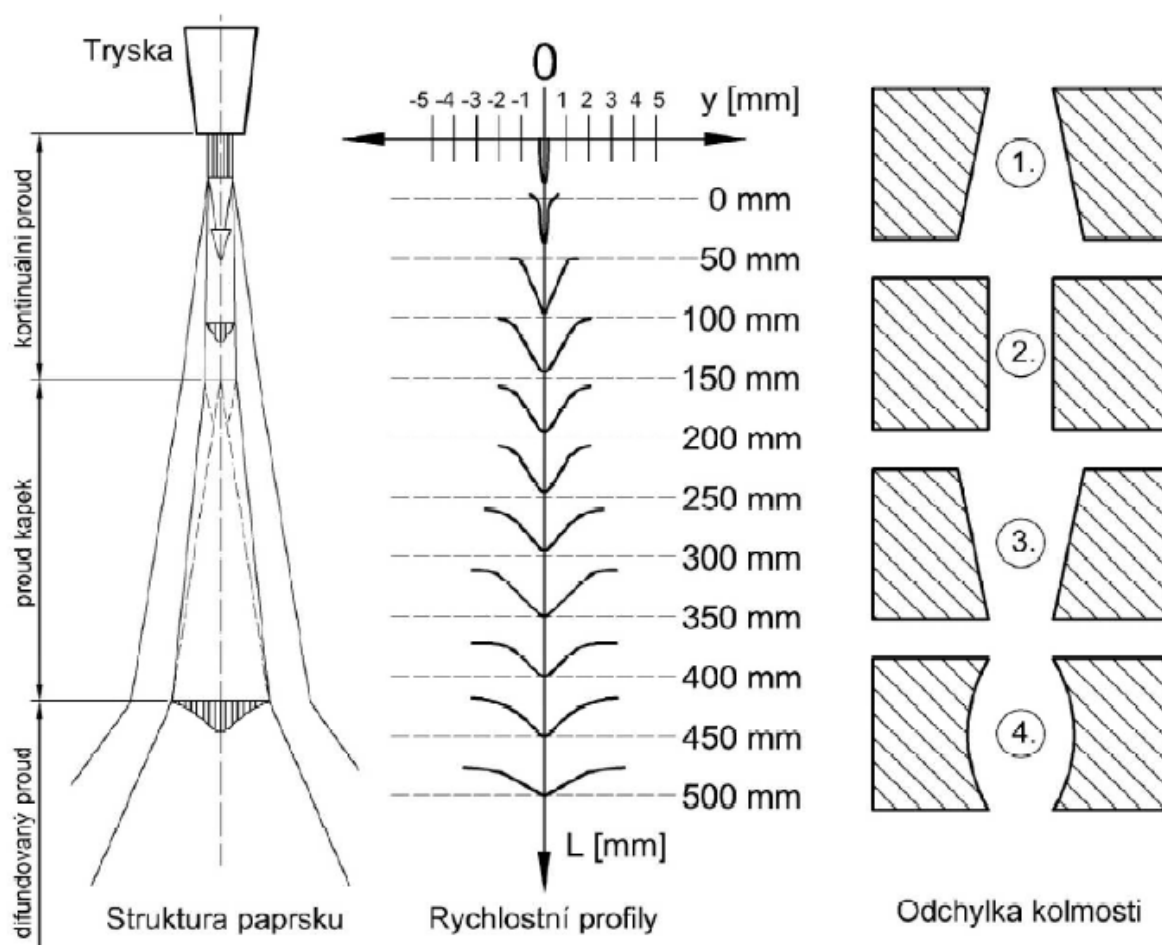
- nastane při optimálním nastavení posuvové rychlosti, toto optimální nastavení se určuje především podle typu a tloušťky řezaného materiálu.

3.) vznikne odchylka kolmosti ve tvaru V

- nastane při velmi rychlé posuvové rychlosti nebo při řezu tvrdých materiálů,
- vodní paprsek zde ztrácí kinetickou energii a neprobrousí svou přirozenou stopu, naopak se začne zmenšovat.

4.) vznikne soudková odchylka kolmosti

- nastává při řezání velmi hrubých materiálů,
- střed řezu je zde širší než v horní a dolní erozní bázi, kde vodní paprsek ztrácí svou kinetickou energii a zmenšuje se.



Obr. 4.5 Přirozená kuželovitá struktura vodního paprsku a typy možné geometrie řezné mezery [36].

4.5.3 Neúplný konec řezu

Neúplný konec řezu nastane, když při řezání nedojde k proříznutí řezaného materiálu v celé jeho hloubce. Tento jev většinou nastává při náhlém zastavení nebo výrazném snížení posuvové rychlosti řezací hlavy. Tehdy totiž může dojít k přeskočení vodního paprsku, čímž vznikne neproříznutá část [36].

4.5.4 Povrchové vady

Při řezání vodním paprskem může docházet ke vzniku vzhledových kazů nebo i k odstranění povrchové úpravy na řezaném materiálu. Tyto vady vznikají při rozptýlení kapaliny a abrazivních částic, což může nastat například při příliš velkém přiblížení trysky k řezanému materiálu. Tento problém se však dá odstranit přiložením měkkého materiálu (například dřevotřísky) na řezaný povrch [36].

5 EXPERIMENTÁLNÍ ZJIŠTĚNÍ KVALITY ŘEZU V SOUVISLOSTI SE ZMĚNAMI TECHNOLOGICKÝCH PODMÍNEK

Tato kapitola se zabývá experimentem, jehož cílem je zjistit, jakou souvislost mají vybrané technologické parametry vodního paprsku s výslednou kvalitou řezu. Experiment je založen na změně tří parametrů, přičemž se sleduje, jakou mají odezvu na drsnost povrchu a odchylku kolmosti řezu. Cílem je také zjistit, kdy dochází k náhlé a skokové změně drsnosti řezné plochy.

V tomto experimentu se budou hledat souvislosti změn kvality řezu na těchto technologických parametrech:

- druhu řezaného materiálu,
- tloušťce řezaného materiálu,
- rychlosti posuvu řezací hlavy.

První část této kapitoly se zaměřuje na použité pracovní zařízení pro řezání vodním paprskem a měřicí zařízení na zjištění průměrné aritmetické úchyly. Poté se zabývá rozбором použitých vzorků materiálů. V neposlední řadě tato kapitola vyhodnocuje souvislosti změn kvality řezu na výše uvedených technologických parametrech.

5.1 Použité pracovní zařízení pro řezání vodním paprskem

Řezání vzorků bylo provedeno ve firmě AWAC spol. s r.o. na zařízení pro řezání vodním paprskem, jenž se skládá z hydraulické jednotky Streamline SL-V 50 (obr. 5.1) a CNC stolu MicroStep AqaCut 4001.25 (obr. 5.2)



Obr. 5.1 Hydraulická jednotka Streamline SL-V 50.



Obr. 5.2 CNC stůl MicroStep AquaCut 4001.25

Parametry zařízení:

- pracovní tlak: 380 MPa,
- rychlost posuvu řezací hlavy: až $20\,000\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,
- hmotnostní tok abraziva: až $600\text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$,
- rozměr stolu: $2\,500 \times 4\,000\text{ mm}$.

5.2 Použité měřicí zařízení na zjištění průměrné aritmetické úchytky

Na určení velikostí průměrných aritmetických úchytek profilů ploch řezaných materiálů byl použit profilometr Taylor Hobson form Talysurf 50 (obr. 5.3).



Obr. 5.3 profilometr Taylor Hobson form Talysurf 50 [38].

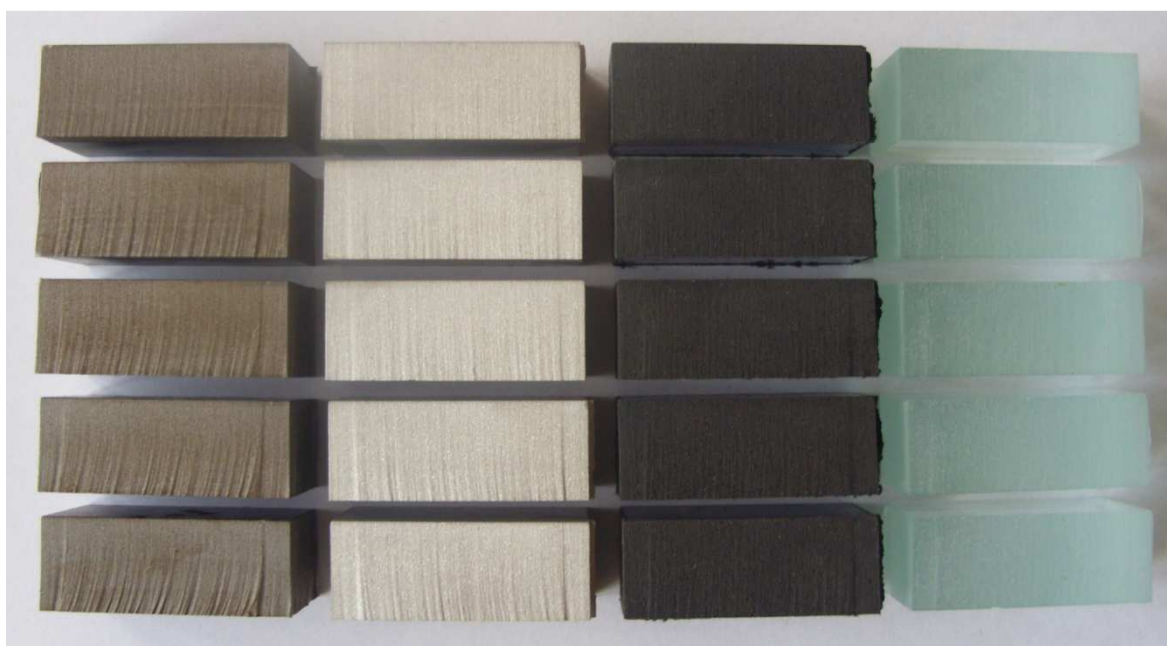
Základní parametry profilometru Taylor Hobson form Talysurf 50 [38]:

- rozlišení: 16 nm,
- vertikální rozsah: 1 mm,
- horizontální délka snímání: 0,1 až 50 mm,
- úchylka přímosti na 50 mm: 0,4 μm ,
- rychlost snímání: 1 až 10 mm.s^{-1} ,
- datová rozteč: 0,5 μm .

5.3 Rozbor použitých materiálů

Na experiment byly použity čtyři rozdílné materiály, které jsou běžně řezané technologií vodního paprsku (obr. 5.3):

- ocel S355J0 EN 10025-2:2004 (ocel 11 523),
- hliník EN AW-5083,
- plastický materiál PE-HWU,
- sklo.



Obr 5.3 Vzorky tloušťky 15 mm z použitých materiálů (zleva: ocel S355J0 EN 10025-2:2004, hliník EN AW-5083, plastický materiál PE-HWU, sklo).

Chemické složení a vybrané mechanické a technologické vlastnosti materiálů použitých při experimentu jsou uvedeny v následujících tabulkách (tab. 5.1, tab. 5.2, tab. 5.3) [39, 40, 41].

Tab. 5.1 Chemické složení a vybrané mechanické a technologické vlastnosti oceli S355J0 EN 10025-2:2004.

| Ocel S355J0 EN 10025-2:2004 | | | | | | |
|---|----------|---------|-----------|-----------|-----------|----------|
| Chemické složení – hmotnostní podíl [%] | | | | | | |
| C | Si | Mn | P | S | N | Cu |
| max 0,012 | max 0,55 | max 1,6 | max 0,035 | max 0,035 | max 0,012 | max 0,55 |
| Mechanické a technologické vlastnosti | | | | | | |
| Mez kluzu Re [MPa] | | | | | min 355 | |
| Mez pevnosti Rm [MPa] | | | | | 470 - 630 | |
| Tažnost A ₅ [%] | | | | | min 22 | |

Tab. 5.2 Chemické složení a vybrané mechanické a technologické vlastnosti hliníku EN AW-5083.

| Hliník EN AW-5083 | | | | | | | |
|---|-----|-----|-----------|-----------|-------------|-----------|------|
| Chemické složení – hmotnostní podíl [%] | | | | | | | |
| Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Ti |
| 0,4 | 0,4 | 0,1 | 0,4 - 1,0 | 4,0 – 4,9 | 0,05 - 0,25 | 0,25 | 0,15 |
| Mechanické a technologické vlastnosti | | | | | | | |
| Mez kluzu Rp _{0,2} [MPa] | | | | | | min 125 | |
| Mez pevnosti Rm [MPa] | | | | | | 275 - 350 | |
| Tažnost A ₅ [%] | | | | | | min 13 | |

Tab. 5.3 Vybrané mechanické a technologické vlastnosti plastického materiálu PE-HWU.

| Plastický materiál PE-HWU | |
|--|------------|
| Popis: | |
| tepelně stabilní, UV stabilizovaný, černý | |
| Mechanické a technologické vlastnosti: | |
| Hustota [g.cm^{-3}] | 0,955 |
| Mez kluzu [MPa] | 22 |
| Modul pružnosti v tahu [MPa] | 900 |
| Vrubová houževnatost [kJ.m^{-2}] | 19 |
| Tvrdost [Shore D] | 64 |
| Teplotní rozsah použitelnosti [$^{\circ}\text{C}$] | -50 až +80 |

5.4 Vlastní experiment

Experiment je založen na sledování změny kvality řezu v závislosti na změně rychlosti posuvu řezací hlavy. Postupně jsou řezány čtyři rozdílné druhy materiálů, přičemž se každý řezaný materiál řeže o tloušťkách 5, 10 a 15 mm.

Velikost rychlosti posuvu řezací hlavy je volena jako 60 %, 80 %, 100 %, 120 % a 140 % optimální rychlosti používané ve firmě AWAC spol. s.r.o., která je pro každý materiál a tloušťku vzorku odlišná.

Kvalita povrchu řezaného vzorku se v tomto experimentu posuzuje pomocí naměřené velikosti průměrné aritmetické úchyly profilu Ra. Dále se zde také určuje velikost odchylky kolmosti řezu a to za pomoci naměření rozdílu šířek vzorků mezi horní a dolní hranou pomocí třmenového mikrometru.

Průměrné aritmetické úchyly profilu Ra jsou z důvodu vyšší vypovídající hodnoty měřeny v horní a dolní kontuře řezné hrany vzorků. Při řezání totiž dochází k výrazné ztrátě kinetické energie vodního paprsku, což má za následek zhoršení kvality řezu v dolní kontuře.

V první části této kapitoly jsou uvedeny technologické parametry, při kterých byly vzorky řezány. Poté se zaměřuje na každý druh řezaného materiálu zvlášť. U každého materiálu jsou zpracovány tabulky naměřených hodnot průměrných aritmetických úchylek Ra a odchylek kolmosti řezu, z nichž jsou následně vytvořeny grafy závislostí. V neposlední řadě jsou tyto hodnoty vyhodnoceny.

5.4.1 Řezné parametry

Pro řezání vzorků byly zvoleny tyto parametry:

- pracovní tlak: 380 MPa
- hmotnostní tok abraziva: 540 g.min⁻¹
- vzdálenost trysky od obráběného materiálu: 1 mm
- průměr vodní trysky: 0,33 mm
- průměr abrazivní trysky: 1,02 mm
- abrazivo: indický granát
- velikost abrazivních částic: 80 mesh

5.4.2 Řezání vzorků z oceli S355J0 EN 10025-2:2004

Na vzorcích z oceli S355J0 EN 10025-2:2004 o tloušťkách 5, 10 a 15 mm byly naměřeny velikosti průměrných aritmetických úchylek profilu Ra (tab. 5.4, 5.5, 5.6), z nichž byl následně zhotoven graf závislosti průměrné aritmetické úchyly profilu Ra na změně rychlosti posuvu řezací hlavy (obr. 5.4).

Tab. 5.4 Průměrné aritmetické úchyly profilu Ra [μm] naměřené na vzorcích z oceli S355J0 EN 10025-2:2004 tloušťky 5 mm.

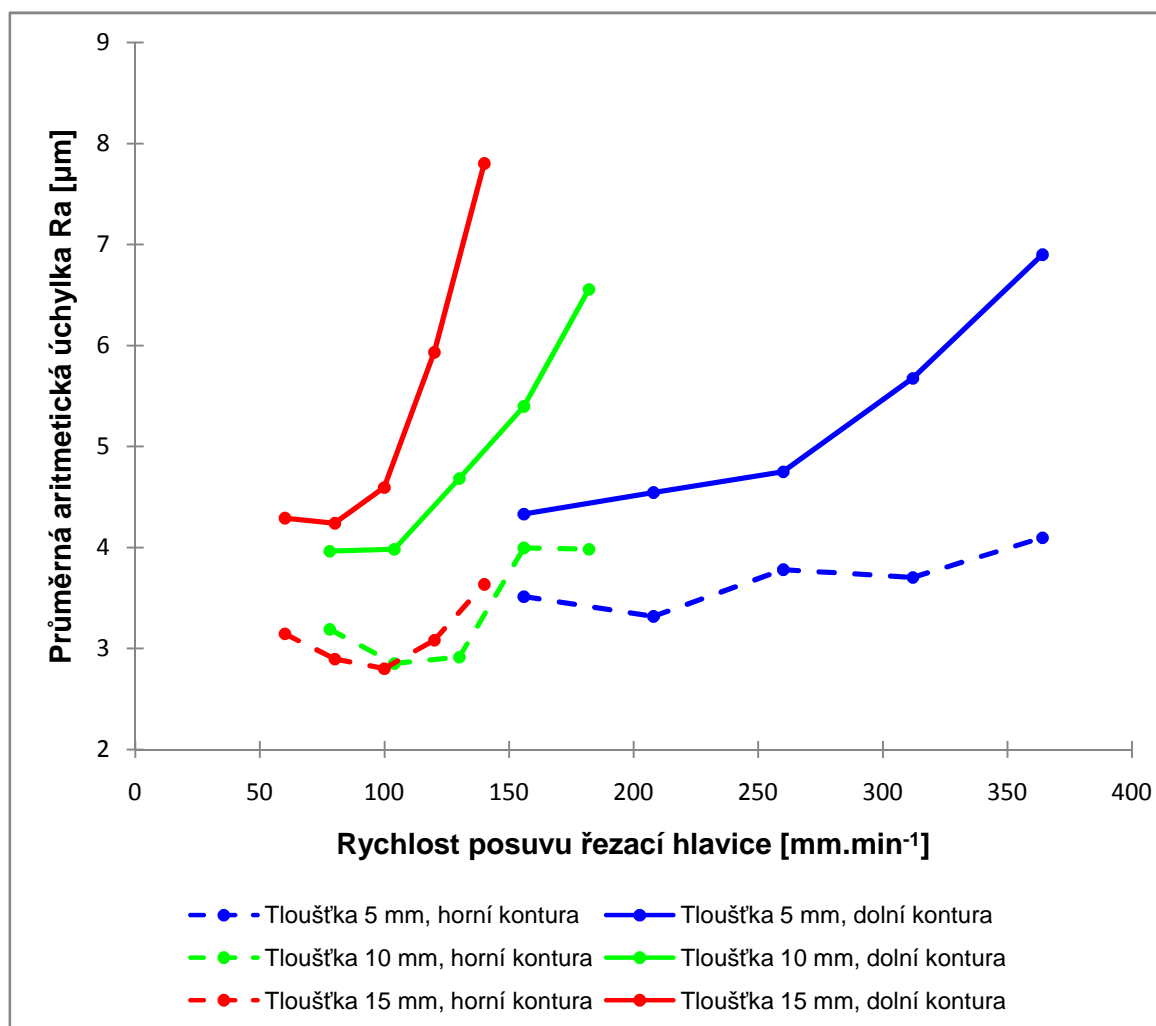
| Pozice měření | Rychlost posuvu řezací hlavy [mm.min^{-1}] | | | | |
|---------------|---|--------|--------|--------|--------|
| | 156 | 208 | 260 | 312 | 364 |
| horní | 3,5143 | 3,3165 | 3,7786 | 3,7034 | 4,0965 |
| spodní | 4,3324 | 4,5424 | 4,7499 | 5,6750 | 6,8969 |

Tab. 5.5 Průměrné aritmetické úchyly profilu Ra [μm] naměřené na vzorcích z oceli S355J0 EN 10025-2:2004 tloušťky 10 mm.

| Pozice měření | Rychlost posuvu řezací hlavy [mm.min^{-1}] | | | | |
|---------------|---|--------|--------|--------|--------|
| | 78 | 104 | 130 | 156 | 182 |
| horní | 3,1902 | 2,8526 | 2,9151 | 3,9942 | 3,9826 |
| spodní | 3,9636 | 3,9822 | 4,6841 | 5,3944 | 6,5552 |

Tab. 5.6 Průměrné aritmetické úchyly profilu Ra [μm] naměřené na vzorcích z oceli S355J0 EN 10025-2:2004 tloušťky 15 mm.

| Pozice měření | Rychlost posuvu řezací hlavy [mm.min^{-1}] | | | | |
|---------------|---|--------|--------|--------|--------|
| | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 |
| horní | 3,1473 | 2,8970 | 2,8010 | 3,0830 | 3,6328 |
| spodní | 4,2885 | 4,2379 | 4,5956 | 5,9304 | 7,7998 |



Obr. 5.4 Graf závislosti průměrné aritmetické úchyly profilu Ra na změně rychlosti posuvu řezací hlavy u vzorků z oceli S355J0 EN 10025-2:2004.

Na vzorcích z oceli S355J0 EN 10025-2:2004 byly naměřeny šířky na horní a dolní hraně, z nichž byla zjištěna velikost odchylky kolmosti řezu (tab. 5.7, 5.8, 5.9), z těchto hodnot byl následně zhotoven graf závislosti odchylky kolmosti řezu na rychlosti posuvu řezací hlavy (obr. 5.5).

Tab. 5.7 Naměřené šířky na horní a dolní hraně a zjištěné odchylky kolmosti řezu na vzorcích z oceli S355J0 EN 10025-2:2004 tloušťky 5 mm.

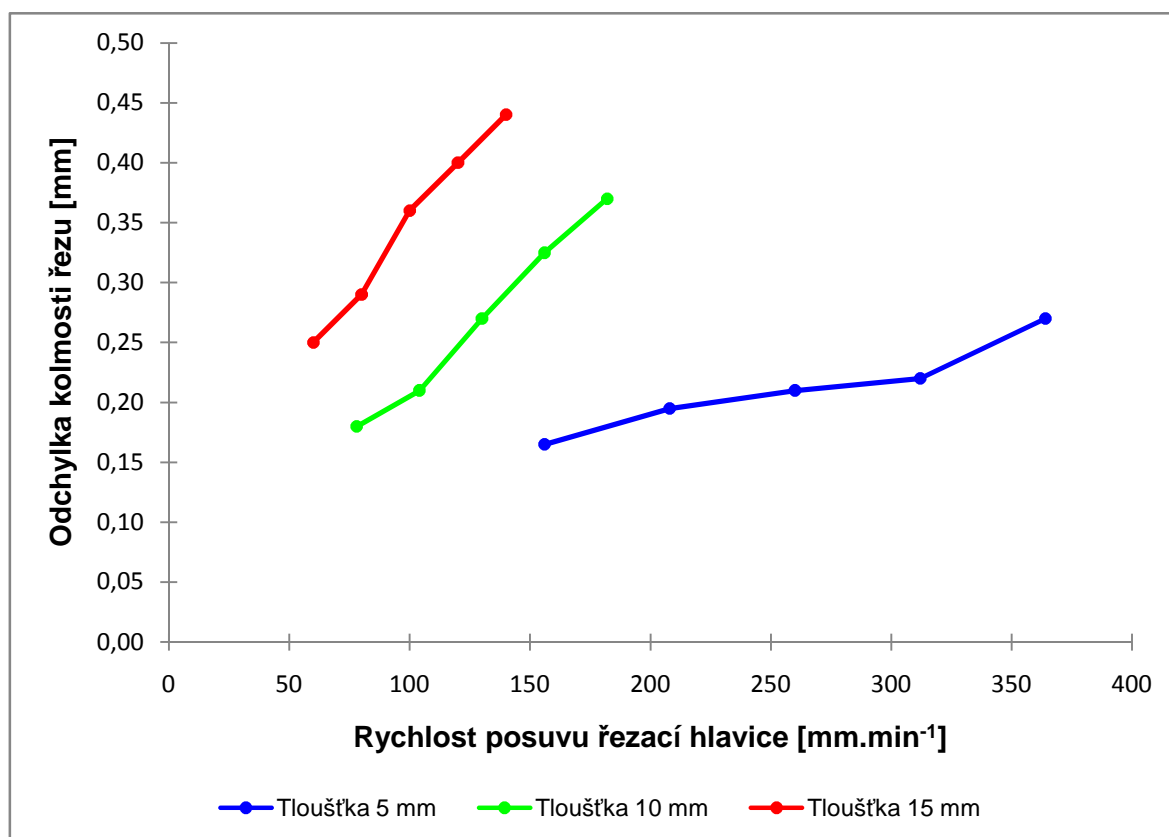
| Vzorek tloušťky 5 mm | | Rychlost posuvu řezací hlavy [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$] | | | | |
|------------------------|-------|--|-------|-------|-------|-------|
| | | 156 | 208 | 260 | 213 | 364 |
| Měřená hrana [mm] | horní | 19,79 | 19,84 | 19,86 | 19,92 | 19,85 |
| | dolní | 20,12 | 20,23 | 20,28 | 20,36 | 20,39 |
| Odchylka kolmosti [mm] | | 0,165 | 0,195 | 0,21 | 0,22 | 0,27 |

Tab. 5.8 Naměřené šířky na horní a dolní hraně a zjištěné odchylky kolmosti řezu na vzorcích z oceli S355J0 EN 10025-2:2004 tloušťky 10 mm.

| Vzorek tloušťky 10 mm | | Rychlost posuvu řezací hlavy [mm.min ⁻¹] | | | | |
|------------------------|-------|--|-------|-------|-------|-------|
| | | 78 | 104 | 130 | 156 | 182 |
| Měřená hrana [mm] | horní | 19,86 | 19,85 | 19,81 | 19,77 | 19,79 |
| | dolní | 20,22 | 20,27 | 20,35 | 20,42 | 20,53 |
| Odchylka kolmosti [mm] | | 0,18 | 0,21 | 0,27 | 0,325 | 0,37 |

Tab. 5.9 Naměřené šířky na horní a dolní hraně a zjištěné odchylky kolmosti řezu na vzorcích z oceli S355J0 EN 10025-2:2004 tloušťky 15 mm.

| Vzorek tloušťky 15 mm | | Rychlost posuvu řezací hlavy [mm.min ⁻¹] | | | | |
|------------------------|-------|--|-------|-------|-------|-------|
| | | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 |
| Měřená hrana [mm] | horní | 19,88 | 19,86 | 19,88 | 19,92 | 19,97 |
| | dolní | 20,38 | 20,44 | 20,60 | 20,72 | 20,85 |
| Odchylka kolmosti [mm] | | 0,25 | 0,29 | 0,36 | 0,40 | 0,44 |



Obr. 5.5 Graf závislosti odchylky kolmosti řezu na rychlosti posuvu řezací hlavy u vzorků z oceli S355J0 EN 10025-2:2004.

5.4.3 Řezání vzorků z hliníku EN AW-5083

Na vzorcích z hliníku EN AW-5083 o tloušťkách 5, 10 a 15 mm byly naměřeny velikosti průměrných aritmetických úchylek profilu R_a (tab. 5.10, 5.11, 5.12), z nichž byl následně zhotoven graf závislosti průměrné aritmetické úchyly profilu R_a na změně rychlosti posuvu řezací hlavy (obr. 5.6).

Tab. 5.10 Průměrné aritmetické úchyly profilu R_a [μm] naměřené na vzorcích z hliníku EN AW-5083 tloušťky 5 mm.

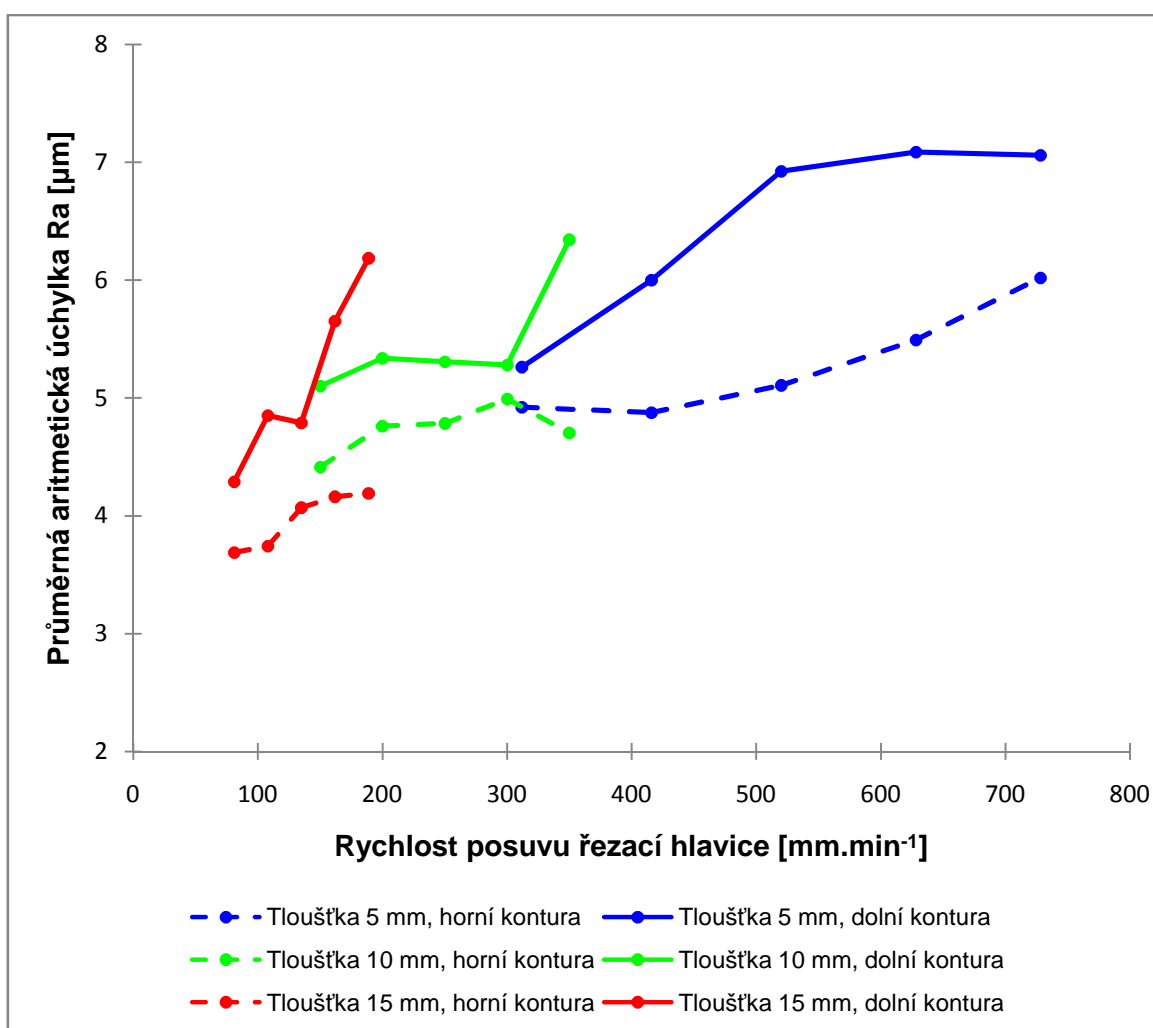
| Pozice měření | Rychlost posuvu řezací hlavy [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$] | | | | |
|---------------|--|--------|--------|--------|--------|
| | 312 | 416 | 520 | 628 | 728 |
| horní | 4,9216 | 4,8755 | 5,1056 | 5,4925 | 6,0193 |
| spodní | 5,2599 | 5,9995 | 6,9240 | 7,0862 | 7,0590 |

Tab. 5.11 Průměrné aritmetické úchyly profilu R_a [μm] naměřené na vzorcích z hliníku EN AW-5083 tloušťky 10 mm.

| Pozice měření | Rychlost posuvu řezací hlavy [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$] | | | | |
|---------------|--|--------|--------|--------|--------|
| | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 |
| horní | 4,4133 | 4,761 | 4,7817 | 4,9922 | 4,7053 |
| spodní | 5,1011 | 5,3369 | 5,3069 | 5,2802 | 6,3409 |

Tab. 5.12 Průměrné aritmetické úchyly profilu R_a [μm] naměřené na vzorcích z hliníku EN AW-5083 tloušťky 15 mm.

| Pozice měření | Rychlost posuvu řezací hlavy [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$] | | | | |
|---------------|--|--------|--------|--------|--------|
| | 81 | 108 | 135 | 162 | 189 |
| horní | 3,6892 | 3,7438 | 4,0678 | 4,1597 | 4,1915 |
| spodní | 4,2885 | 4,8512 | 4,7880 | 5,6534 | 6,1837 |



Obr. 5.6 Graf závislosti průměrné aritmetické úchylky profilu R_a na změně rychlosti posuvu řezací hlavy u vzorků z hliníku EN AW-5083.

Na vzorcích z hliníku EN AW-5083 byly naměřeny šířky na horní a dolní hraně, z nichž byla zjištěna velikost odchylky kolmosti řezu (tab. 5.13, 5.14, 5.15), z těchto hodnot byl následně zhotoven graf závislosti odchylky kolmosti řezu na rychlosti posuvu řezací hlavy (obr. 5.7).

Tab. 5.13 Naměřené šířky na horní a dolní hraně a zjištěné odchylky kolmosti řezu na vzorcích z hliníku EN AW-5083 tloušťky 5 mm.

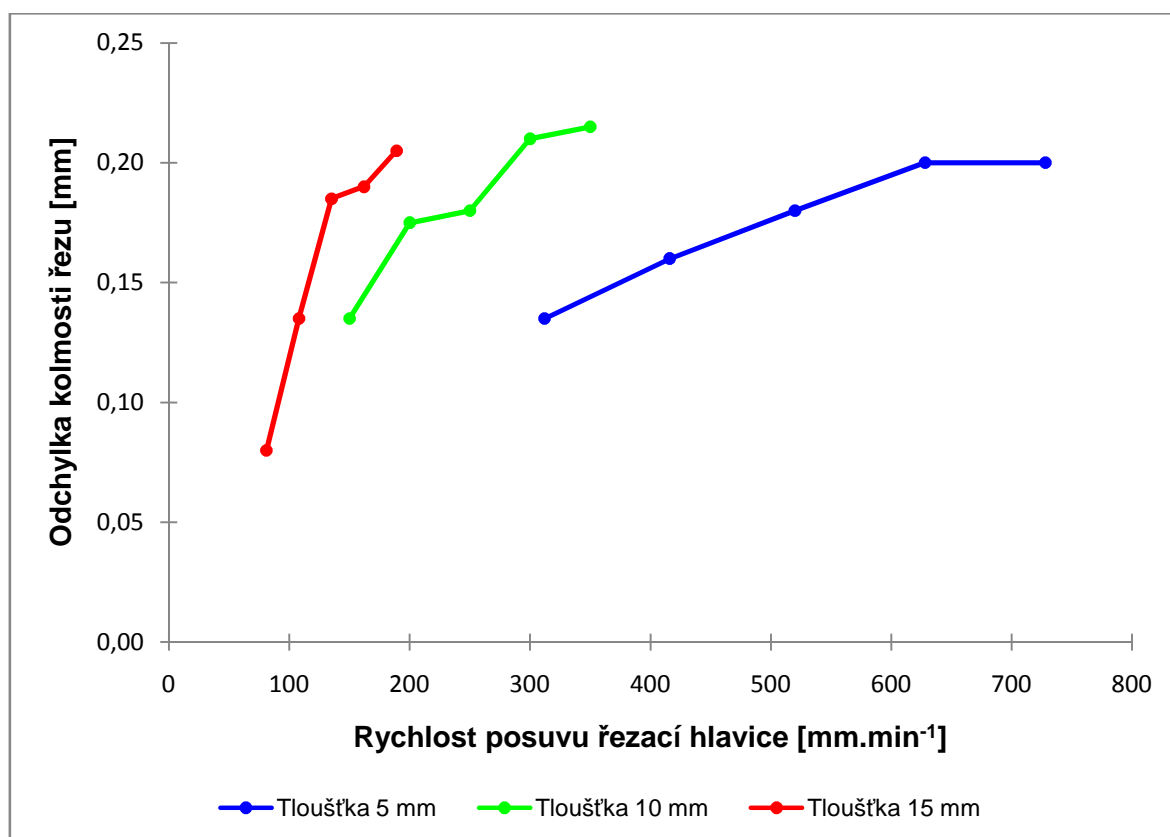
| Vzorek tloušťky 5 mm | | Rychlost posuvu řezací hlavy [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$] | | | | |
|------------------------|-------|--|-------|-------|-------|-------|
| | | 312 | 416 | 520 | 628 | 728 |
| Měřená hrana [mm] | horní | 19,76 | 19,75 | 19,76 | 19,79 | 19,85 |
| | dolní | 20,03 | 20,07 | 20,12 | 20,19 | 20,25 |
| Odchylka kolmosti [mm] | | 0,135 | 0,16 | 0,18 | 0,20 | 0,20 |

Tab. 5.14 Naměřené šířky na horní a dolní hraně a zjištěné odchyly kolmosti řezu na vzorcích z hliníku EN AW-5083 tloušťky 10 mm.

| Vzorek tloušťky 10 mm | | Rychlost posuvu řezací hlavy [mm.min ⁻¹] | | | | |
|------------------------|-------|--|-------|-------|-------|-------|
| | | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 |
| Měřená hrana [mm] | horní | 19,75 | 19,70 | 19,72 | 19,75 | 19,80 |
| | dolní | 20,02 | 20,05 | 20,08 | 20,17 | 20,23 |
| Odchylka kolmosti [mm] | | 0,135 | 0,175 | 0,18 | 0,21 | 0,215 |

Tab. 5.15 Naměřené šířky na horní a dolní hraně a zjištěné odchyly kolmosti řezu na vzorcích z hliníku EN AW-5083 tloušťky 15 mm.

| Vzorek tloušťky 15 mm | | Rychlost posuvu řezací hlavy [mm.min ⁻¹] | | | | |
|------------------------|-------|--|-------|-------|-------|-------|
| | | 81 | 108 | 135 | 162 | 189 |
| Měřená hrana [mm] | horní | 19,68 | 19,69 | 19,70 | 19,76 | 19,82 |
| | dolní | 19,84 | 19,96 | 20,07 | 20,14 | 20,23 |
| Odchylka kolmosti [mm] | | 0,08 | 0,135 | 0,185 | 0,19 | 0,205 |



Obr. 5.7 Graf závislosti odchyly kolmosti řezu na rychlosti posuvu řezací hlavy u vzorků z hliníku EN AW-5083.

5.4.4 Řezání vzorků z plastického materiálu PE-HWU

Na vzorcích z plastického materiálu PE-HWU o tloušťkách 5, 10 a 15 mm byly naměřeny velikosti průměrných aritmetických úchylek profilu Ra (tab. 5.16, 5.17, 5.18), z nichž byl následně zhotoven graf závislosti průměrné aritmetické úchyly profilu Ra na změně rychlosti posuvu řezací hlavy (obr. 5.8).

Tab. 5.16 Průměrné aritmetické úchyly profilu Ra [μm] naměřené na vzorcích z plastického materiálu PE-HWU tloušťky 5 mm.

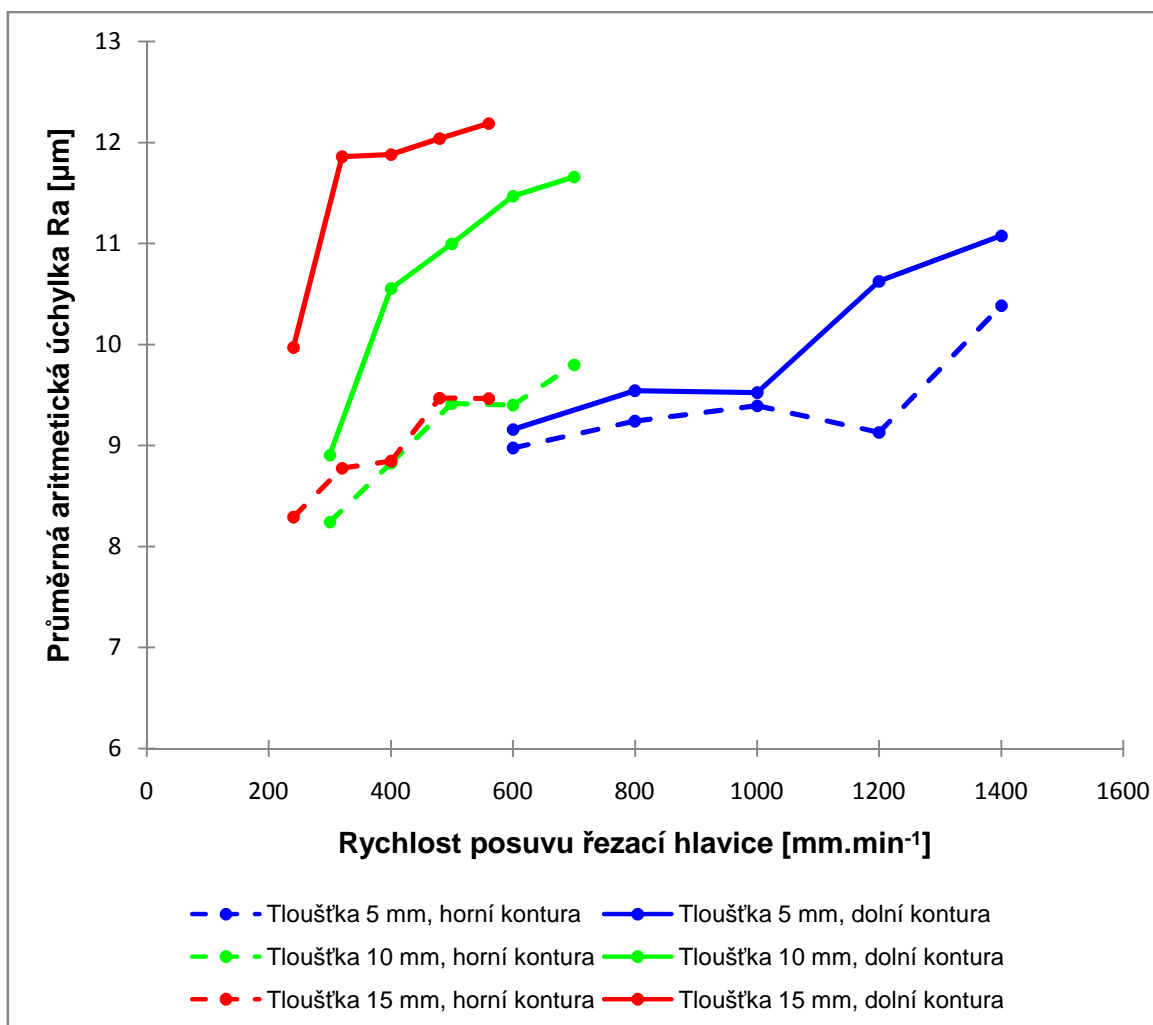
| Pozice měření | Rychlost posuvu řezací hlavy [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$] | | | | |
|---------------|--|--------|--------|---------|---------|
| | 600 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 |
| horní | 8,9732 | 9,2394 | 9,3931 | 9,1297 | 10,3838 |
| spodní | 9,1588 | 9,5404 | 9,5215 | 10,6267 | 11,0756 |

Tab. 5.17 Průměrné aritmetické úchyly profilu Ra [μm] naměřené na vzorcích z plastického materiálu PE-HWU tloušťky 10 mm.

| Pozice měření | Rychlost posuvu řezací hlavy [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$] | | | | |
|---------------|--|---------|---------|---------|---------|
| | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 |
| horní | 8,2435 | 8,8241 | 9,4162 | 9,3976 | 9,7991 |
| spodní | 8,9047 | 10,5514 | 10,9974 | 11,4687 | 11,6577 |

Tab. 5.18 Průměrné aritmetické úchyly profilu Ra [μm] naměřené na vzorcích z plastického materiálu PE-HWU tloušťky 15 mm.

| Pozice měření | Rychlost posuvu řezací hlavy [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$] | | | | |
|---------------|--|---------|---------|---------|---------|
| | 240 | 320 | 400 | 480 | 560 |
| horní | 8,2890 | 8,7750 | 8,8429 | 9,4683 | 9,4669 |
| spodní | 9,9684 | 11,8566 | 11,8804 | 12,0387 | 12,1886 |



Obr. 5.8 Graf závislosti průměrné aritmetické úchylky profilu Ra na změně rychlosti posuvu řezací hlavy u vzorků z plastického materiálu PE-HWU.

Na vzorcích z plastického materiálu PE-HWU byly naměřeny šířky na horní a dolní hraně, z nichž byla zjištěna velikost odchylky kolmosti řezu (tab. 5.19, 5.20, 5.21), z těchto hodnot byl následně zhotoven graf závislosti odchylky kolmosti řezu na rychlosti posuvu řezací hlavy (obr. 5.9).

Tab. 5.19 Naměřené šířky na horní a dolní hraně a zjištěné odchylky kolmosti řezu na vzorcích z plastického materiálu PE-HWU tloušťky 5 mm.

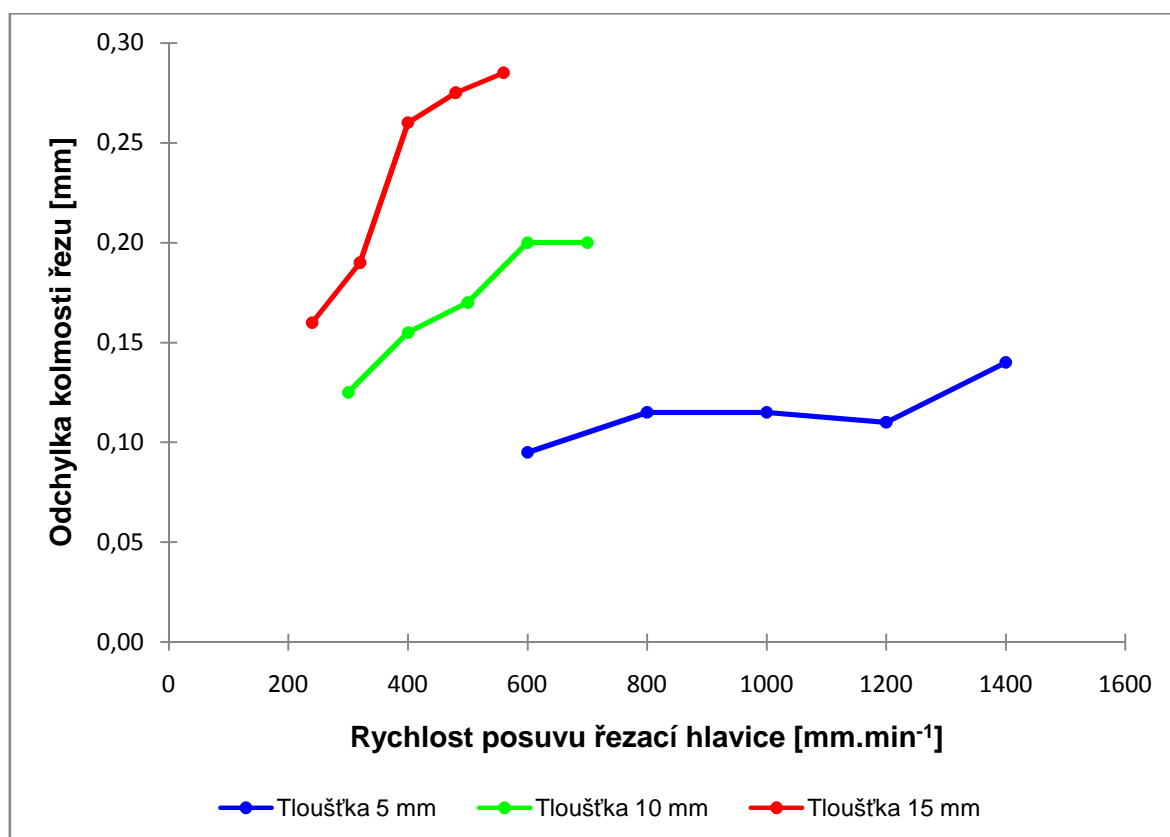
| Vzorek tloušťky 5 mm | | Rychlost posuvu řezací hlavy [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$] | | | | |
|------------------------|-------|--|-------|-------|-------|-------|
| | | 600 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 |
| Měřená hrana [mm] | horní | 19,74 | 19,73 | 19,75 | 19,80 | 19,84 |
| | dolní | 19,93 | 19,96 | 19,98 | 20,03 | 20,12 |
| Odchylka kolmosti [mm] | | 0,095 | 0,115 | 0,115 | 0,11 | 0,14 |

Tab. 5.20 Naměřené šířky na horní a dolní hraně a zjištěné odchytky kolmosti řezu na vzorcích z plastického materiálu PE-HWU tloušťky 10 mm.

| Vzorek tloušťky 10 mm | | Rychlost posuvu řezací hlavy [mm.min ⁻¹] | | | | |
|------------------------|-------|--|-------|-------|-------|-------|
| | | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 |
| Měřená hrana [mm] | horní | 19,66 | 19,65 | 19,71 | 19,75 | 19,80 |
| | dolní | 19,91 | 19,96 | 20,05 | 20,15 | 20,20 |
| Odchytky kolmosti [mm] | | 0,125 | 0,155 | 0,17 | 0,20 | 0,20 |

Tab. 5.21 Naměřené šířky na horní a dolní hraně a zjištěné odchytky kolmosti řezu na vzorcích z plastického materiálu PE-HWU tloušťky 15 mm.

| Vzorek tloušťky 15 mm | | Rychlost posuvu řezací hlavy [mm.min ⁻¹] | | | | |
|------------------------|-------|--|-------|-------|-------|-------|
| | | 240 | 320 | 400 | 480 | 560 |
| Měřená hrana [mm] | horní | 19,64 | 19,67 | 19,60 | 19,65 | 19,68 |
| | dolní | 19,96 | 20,05 | 20,12 | 20,20 | 20,25 |
| Odchytky kolmosti [mm] | | 0,16 | 0,19 | 0,26 | 0,275 | 0,285 |



Obr. 5.9 Graf závislosti odchytky kolmosti řezu na rychlosti posuvu řezací hlavy u vzorků z plastického materiálu PE-HWU.

5.4.5 Řezání vzorků ze skla

Na vzorcích ze skla o tloušťkách 5, 10 a 15 mm byly naměřeny velikosti průměrných aritmetických úchylek profilu R_a (tab. 5.22, 5.23, 5.24), z nichž byl následně zhotoven graf závislosti průměrné aritmetické úchlky profilu R_a na změně rychlosti posuvu řezací hlavy (obr. 5.10).

Tab. 5.22 Průměrné aritmetické úchlky profilu R_a [μm] naměřené na vzorcích ze skla tloušťky 5 mm.

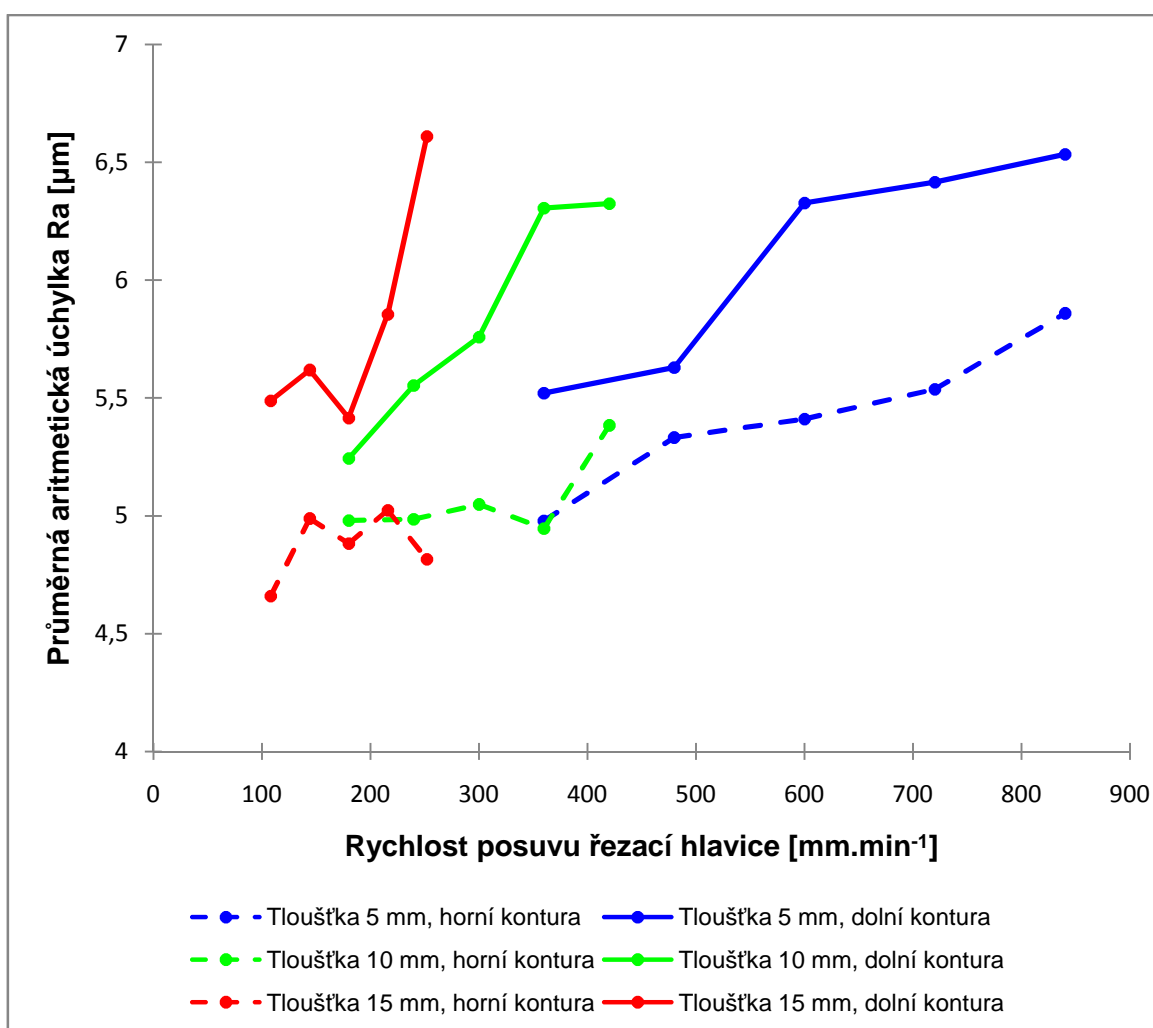
| Pozice měření | Rychlost posuvu řezací hlavy [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$] | | | | |
|---------------|--|--------|--------|--------|--------|
| | 360 | 480 | 600 | 720 | 840 |
| horní | 4,9788 | 5,3313 | 5,4111 | 5,5368 | 5,8582 |
| spodní | 5,5210 | 5,6289 | 6,3272 | 6,4154 | 6,5338 |

Tab. 5.23 Průměrné aritmetické úchlky profilu R_a [μm] naměřené na vzorcích ze skla tloušťky 10 mm.

| Pozice měření | Rychlost posuvu řezací hlavy [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$] | | | | |
|---------------|--|--------|--------|--------|--------|
| | 180 | 240 | 300 | 360 | 420 |
| horní | 4,9801 | 4,9859 | 5,0474 | 4,9461 | 5,3830 |
| spodní | 5,2441 | 5,5533 | 5,7582 | 6,3054 | 6,3250 |

Tab. 5.24 Průměrné aritmetické úchlky profilu R_a [μm] naměřené na vzorcích ze skla tloušťky 15 mm.

| Pozice měření | Rychlost posuvu řezací hlavy [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$] | | | | |
|---------------|--|--------|--------|--------|--------|
| | 108 | 144 | 180 | 216 | 252 |
| horní | 4,6595 | 4,9879 | 4,8829 | 5,0238 | 4,8162 |
| spodní | 5,4884 | 5,6178 | 5,4150 | 5,8546 | 6,6100 |



Obr. 5.10 Graf závislosti průměrné aritmetické úchylky profilu Ra na změně rychlosti posuvu řezací hlavy u vzorků ze skla.

Na vzorcích ze skla byly naměřeny šířky na horní a dolní hraně, z nichž byla zjištěna velikost odchylky kolmosti řezu (tab. 5.25, 5.26, 5.27), z těchto hodnot byl následně zhotoven graf závislosti odchylky kolmosti řezu na rychlosti posuvu řezací hlavy (obr. 5.11).

Tab. 5.25 Naměřené šířky na horní a dolní hraně a zjištěné odchylky kolmosti řezu na vzorcích ze skla tloušťky 5 mm.

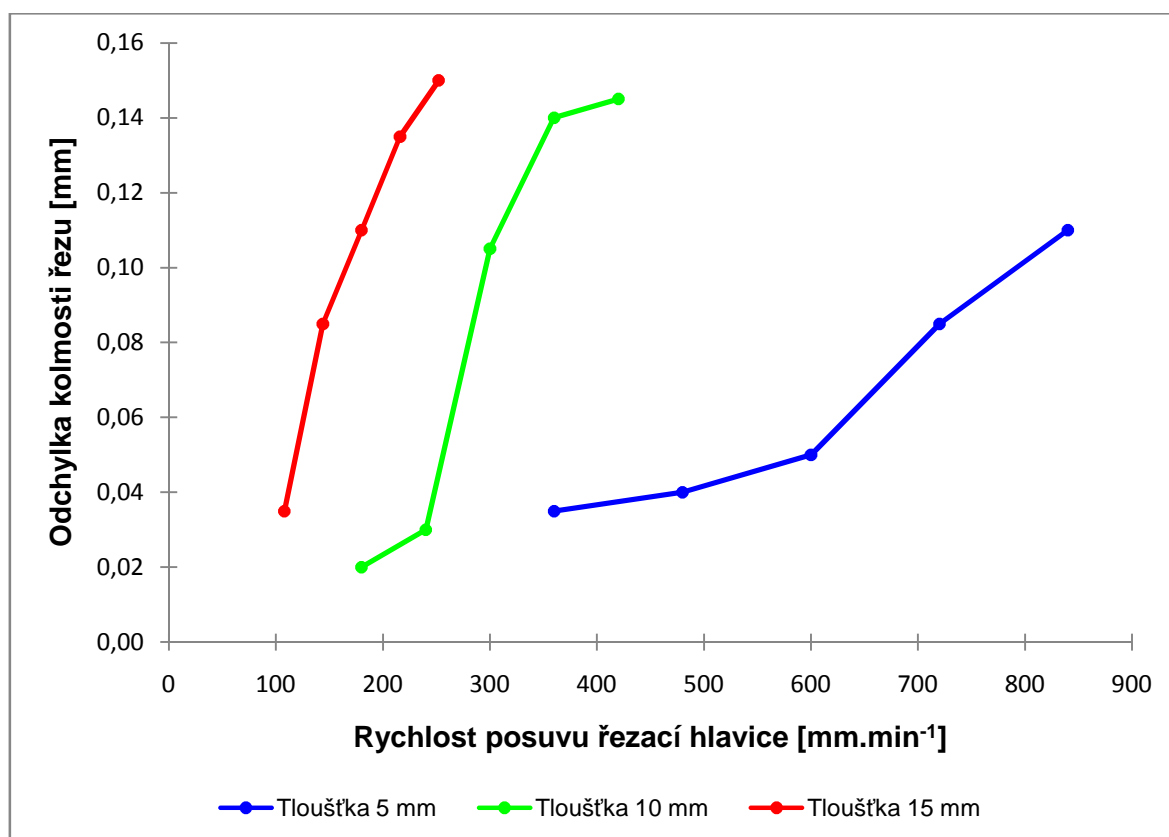
| Vzorek tloušťky 5 mm | | Rychlost posuvu řezací hlavy [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$] | | | | |
|------------------------|-------|--|-------|-------|-------|-------|
| | | 360 | 480 | 600 | 720 | 840 |
| Měřená hrana [mm] | horní | 19,66 | 19,72 | 19,74 | 19,72 | 19,73 |
| | dolní | 19,73 | 19,80 | 19,84 | 19,89 | 19,95 |
| Odchylka kolmosti [mm] | | 0,035 | 0,04 | 0,05 | 0,085 | 0,11 |

Tab. 5.26 Naměřené šířky na horní a dolní hraně a zjištěné odchyly kolmosti řezu na vzorcích ze skla tloušťky 10 mm.

| Vzorek tloušťky 10 mm | | Rychlost posuvu řezací hlavy [mm.min ⁻¹] | | | | |
|------------------------|-------|--|-------|-------|-------|-------|
| | | 180 | 240 | 300 | 360 | 420 |
| Měřená hrana [mm] | horní | 19,74 | 19,66 | 19,64 | 19,65 | 19,68 |
| | dolní | 19,78 | 19,72 | 19,85 | 19,93 | 19,97 |
| Odchylna kolmosti [mm] | | 0,02 | 0,03 | 0,105 | 0,14 | 0,145 |

Tab. 5.27 Naměřené šířky na horní a dolní hraně a zjištěné odchyly kolmosti řezu na vzorcích ze skla tloušťky 15 mm.

| Vzorek tloušťky 15 mm | | Rychlost posuvu řezací hlavy [mm.min ⁻¹] | | | | |
|------------------------|-------|--|-------|-------|-------|-------|
| | | 108 | 144 | 180 | 216 | 252 |
| Měřená hrana [mm] | horní | 19,53 | 19,53 | 19,55 | 19,63 | 19,65 |
| | dolní | 19,60 | 19,70 | 19,77 | 19,90 | 19,95 |
| Odchylna kolmosti [mm] | | 0,035 | 0,085 | 0,11 | 0,135 | 0,15 |



Obr. 5.11 Graf závislosti odchylny kolmosti řezu na rychlosti posuvu řezací hlavy u vzorků ze skla.

5.4.6 Vyhodnocení

Na vzorcích řezaných z oceli S355J0 EN 10025-2:2004 jsou patrné náhlé změny průměrných aritmetických úchylek R_a v dolní kontuře, které lze vysvětlit vznikem deformační zóny řezu z důvodu rychlejší ztráty kinetické energie vodního paprsku. U vzorků tloušťky 5 mm dochází k této náhlé změně po překročení rychlosti posuvu řezací hlavy 260 mm.min⁻¹, u vzorků tloušťky 10 mm po překročení rychlosti posuvu 104 mm.min⁻¹ a u vzorků tloušťky 15 mm po překročení rychlosti posuvu 100 mm.min⁻¹. Před překročením rychlosti posuvu řezací hlavy, jenž má za následek skokovou změnu drsnosti, mají vzorky průměrnou aritmetickou úchylku R_a od 4 do 5 μm. V horní textuře se R_a téměř nemění, jelikož zde ještě nedošlo k žádné ztrátě kinetické energie vodního paprsku a pohybuje se v rozmezí od 3 do 4 μm. Odchylka kolmosti řezu se mění se změnou rychlosti posuvu řezací hlavy téměř lineárně od 0,17 do 0,44 mm.

Na vzorcích řezaných z hliníku EN AW-5083 jsou též patrné změny průměrných aritmetických úchylek R_a v dolní kontuře. U vzorků tloušťky 5 mm dochází k této náhlé změně po překročení rychlosti posuvu řezací hlavy 312 mm.min⁻¹, u vzorků tloušťky 10 mm po překročení rychlosti posuvu 300 mm.min⁻¹ a u vzorků tloušťky 15 mm po překročení rychlosti posuvu 135 mm.min⁻¹. Před překročením rychlosti posuvu řezací hlavy, jenž má za následek skokovou změnu drsnosti, mají vzorky průměrnou aritmetickou úchylku R_a od 4 do 5,5 μm. V horní textuře se R_a mění bez výrazných skokových změn od 3,5 do 5,5 μm. Odchylka kolmosti řezu se pozvolna mění se změnou rychlosti posuvu řezací hlavy v rozmezí od 0,17 do 0,44 mm.

I na vzorcích řezaných z plastického materiálu PE-HWU jsou patrné změny průměrných aritmetických úchylek R_a v dolní kontuře. U vzorků tloušťky 5 mm dochází k této náhlé změně po překročení rychlosti posuvu řezací hlavy 1000 mm.min⁻¹, u vzorků tloušťky 10 mm po překročení rychlosti posuvu 300 mm.min⁻¹ a u vzorků tloušťky 15 mm po překročení rychlosti posuvu 240 mm.min⁻¹. Před překročením rychlosti posuvu řezací hlavy, jenž má za následek skokovou změnu drsnosti, mají vzorky průměrnou aritmetickou úchylku R_a od 9 do 10 μm. V horní textuře se R_a mění pozvolna od 8 do 10 μm. Zajímavostí zde je, že u vzorků tloušťky 5 mm se před náhlou změnou drsnosti dolní kontury obě kontury téměř shodují, což je způsobeno nízkou tvrdostí tohoto materiálu. Odchylka kolmosti řezu se mění se změnou rychlosti posuvu řezací hlavy bez výrazných skokových změn v rozmezí od 0,10 do 0,29 mm.

Na vzorcích řezaných ze skla jsou stejně jako u předchozích materiálů patrné změny průměrných aritmetických úchylek R_a v dolní kontuře. U vzorků tloušťky 5 mm dochází k této náhlé změně po překročení rychlosti posuvu řezací hlavy 480 mm.min⁻¹, u vzorků tloušťky 10 mm po překročení rychlosti posuvu 300 mm.min⁻¹ a u vzorků tloušťky 15 mm po překročení rychlosti posuvu 180 mm.min⁻¹. Před překročením rychlosti posuvu řezací hlavy, jenž má za následek skokovou změnu drsnosti, mají vzorky průměrnou aritmetickou úchylku R_a od 5,2 do 5,8 μm. V horní textuře se R_a mění pozvolna od 4,5 do 5,5 μm. Odchylka kolmosti řezu je zde velmi nízká a mění se se změnou rychlosti posuvu řezací hlavy jen velmi málo v rozmezí od 0,02 do 0,15 mm.

6 TECHNICKO-EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ

Tato kapitola se zabývá technicko-ekonomickým vyhodnocením technologie řezání vodním paprskem. První část pojednává obecně o ekonomice této technologie. Cílem druhé části je zjistit závislost nákladů na výsledné kvalitě řezu.

6.1 Ekonomické zhodnocení technologie vodního paprsku

Řezání vodním paprskem má mnoho technologických výhod (například řez není tepelně ani mechanicky ovlivněn), avšak pro širší využití musí být též ekonomicky efektivní.

Pořizovací náklady pracovního zařízení pro řezání vodním paprskem jsou poměrně vysoké v porovnání s jinými technologiemi dělení materiálů. Tyto náklady se však z důvodu rozšiřování použití vodního paprsku v průmyslu pomalu snižují. Při samotném provozu představují největší náklady použité abrazivo a údržba zařízení (výměna trysek, těsnění, filtrů, roštů, atd.).

Abrazivo může představovat v některých případech až 50 % provozních nákladů. Například cena jednoho gramu granátu (což je nejčastěji používané abrazivo) se pohybuje kolem 10 Kč. Tyto náklady se dají snížit použitím recyklačního zařízení. To může recyklovat 50 až 70 % použitého abraziva.

Údržba pracovního zařízení představuje další neméně důležité náklady. Tyto náklady souvisejí s výměnou již opotřebovaných dílů, jako jsou vodní a abrazivní trysky, rošty, či vysokotlaké a nízkotlaké těsnění a filtry. Největší náklady však představuje výměna vodních a abrazivních trysek. Životnost těchto trysek závisí na mnoho faktorech - tlaku a kvalitě používané vody, druhu použitého abrazivního materiálu, hmotnostního toku abraziva, či souososti vodní a abrazivní trysky. Životnost trysek však nejvíce závisí na typu materiálu, z něhož jsou vyrobeny. Trysky vyrobené ze safíru mají životnost přibližně 200 hodin, přičemž se jejich cena pohybuje okolo 500 Kč. Dnes se již safírové trysky nahrazují diamantovými, které mají až 10x vyšší životnost. Jejich cena je však 10x až 15x vyšší, i přesto se použití těchto trysek vyplatí. Diamantové trysky mají také tu výhodu, že se dají opakovaně čistit, přičemž zůstanou zachovány její vlastnosti [7, 8, 15].

6.2 Závislost nákladů na kvalitě řezu

Cílem této kapitoly je určení závislosti nákladů na kvalitě výsledného řezu. V kapitole 5 bylo zjištěno, jaký vliv má parametr rychlosti posuvu řezací hlavy na kvalitu řezu. Je tedy nutné zjistit, jak se mění náklady právě se změnou tohoto parametru.

První část této kapitoly se zaměřuje na předpoklady, za kterých byl výpočet proveden. Poté se zabývá určením nákladů na obrobek jednoho kusu, které se mění mimo jiné právě také s parametrem posuvu řezací hlavy. Na konec se zde nachází tabulka vypočtených hodnot a grafy závislosti nákladů na výsledné kvalitě řezu.

6.2.1 Předpoklady výpočtu

Výpočet byl proveden za těchto předpokladů:

- řezaný materiál: ocel S355J0 EN 10025-2:2004,
- provozní režie $R = 250 \%$,
- mzdový tarif $M_{tac} = 180 \text{ Kč.hod}^{-1}$,
- jednotkový čas klidu stroje $t_{ma5} = 2 \text{ min}$,
- jednotkový čas pomocného chodu stroje $t_{ma42} = 0,5 \text{ min}$,
- délka řezu $l = 1\,000 \text{ mm}$,
- náklady na abrazivo $N_a = 220 \text{ Kč.hod}^{-1}$,
- náklady na údržbu stroje $N_u = 280 \text{ Kč.hod}^{-1}$,
- náklady na energii a vodu $N_e = 160 \text{ Kč.hod}^{-1}$,
- pořizovací cena stroje $PC = 3\,000\,000 \text{ Kč}$
- doporučená životnost stroje $L = 7 \text{ let}$
- pracovní fond stroje $t_f = 3\,020 \text{ hod}$

6.2.2 Určení nákladů

Výpočty jsou provedeny pro rychlost posuvu řezací hlavy $v_p = 156 \text{ mm.min}^{-1}$ [42].

Určení odpisové sazby:

$$s = \frac{1}{L} 100 \quad (6.1)$$

kde: L [rok] - doporučená životnost stroje

$$s = \frac{1}{7} 100 = 14,29 \%$$

Určení nákladů spojených s odpisem stroje:

$$N_o = \frac{PC \cdot s}{100 \cdot t_f} \quad (6.2)$$

kde: PC [Kč] - pořizovací cena stroje

s [%] - odpisová sazba

t_f [hod] - pracovní fond stroje

$$N_o = \frac{3\,000\,000 \cdot 14,29}{100 \cdot 3\,020} = 141,9 \text{ Kč.hod}^{-1}$$

Určení nákladů na hodinu provozu stroje:

$$N_{hs} = N_a + N_o + N_u + N_e \quad (6.3)$$

kde: N_a [Kč.hod⁻¹] - náklady na abrazivo
 N_o [Kč.hod⁻¹] - náklady spojené s odpisem stroje
 N_u [Kč.hod⁻¹] - náklady na údržbu stroje
 N_e [Kč.hod⁻¹] - náklady na energii a vodu

$$N_{hs} = 220 + 141,9 + 280 + 160 = 801,9 \text{ Kč.hod}^{-1}$$

Určení jednotkového času stroje:

$$t_{ma} = t_{ma5} + t_{ma42} + t_{ma41} = t_{ma5} + t_{ma42} + \frac{l}{v_p} \quad (6.4)$$

kde: t_{ma5} [min] - jednotkový čas klidu stroje
 t_{ma42} [min] - jednotkový čas pomocného chodu stroje
 t_{ma41} [min] - jednotkový čas hlavního chodu stroje
 l [mm] - délka řezu
 v_p [mm.min⁻¹] - rychlost posuvu řezací hlavy

$$t_{ma} = 2 + 0,5 + \frac{1\,000}{156} = 8,91 \text{ min}$$

Určení nákladů na provoz stroje:

$$N_{ps} = \frac{t_{ma}}{60} N_{hs} \quad (6.5)$$

kde: t_{ma} [min] - jednotkový čas stroje
 N_{hs} [Kč.hod⁻¹] - náklady na hodinu provozu stroje

$$N_{ps} = \frac{8,91}{60} 801,9 = 119,09 \text{ Kč}$$

Určení nákladů na mzdy a provozní režii:

$$N_m = \frac{t_{ma}}{60} \left(1 + \frac{R}{100}\right) M_{tAC} \quad (6.6)$$

kde: t_{ma} [min] - jednotkový čas stroje
 R [%] - provozní režie
 M_{tAC} [Kč.hod⁻¹] - mzdový tarif

$$N_m = \frac{8,91}{60} \left(1 + \frac{250}{100} \right) 180 = 93,56 \text{ Kč}$$

Určení celkových nákladů:

$$N = N_m + N_{ps} \quad (6.7)$$

kde: N_m [Kč] - náklady na mzdy a provozní režii

N_{ps} [Kč] - náklady na provoz stroje

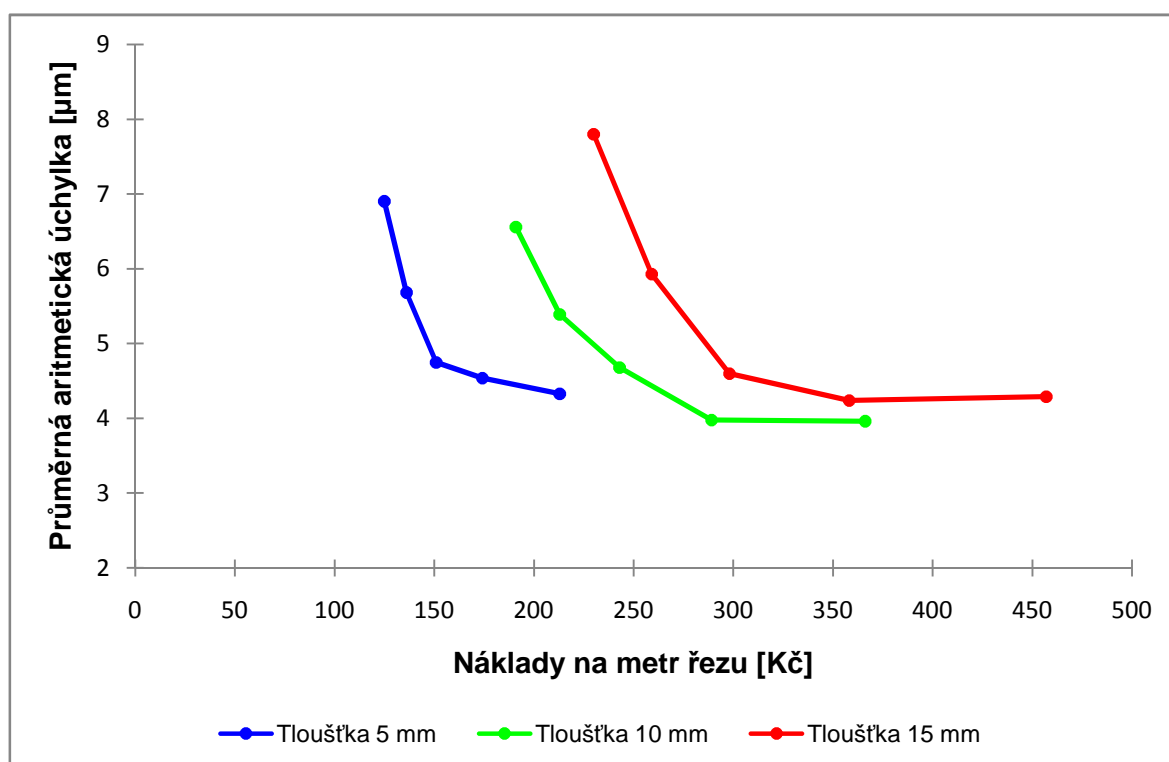
$$N = 93,56 + 119,09 = 212,65 \text{ Kč}$$

6.2.3 Vyhodnocení

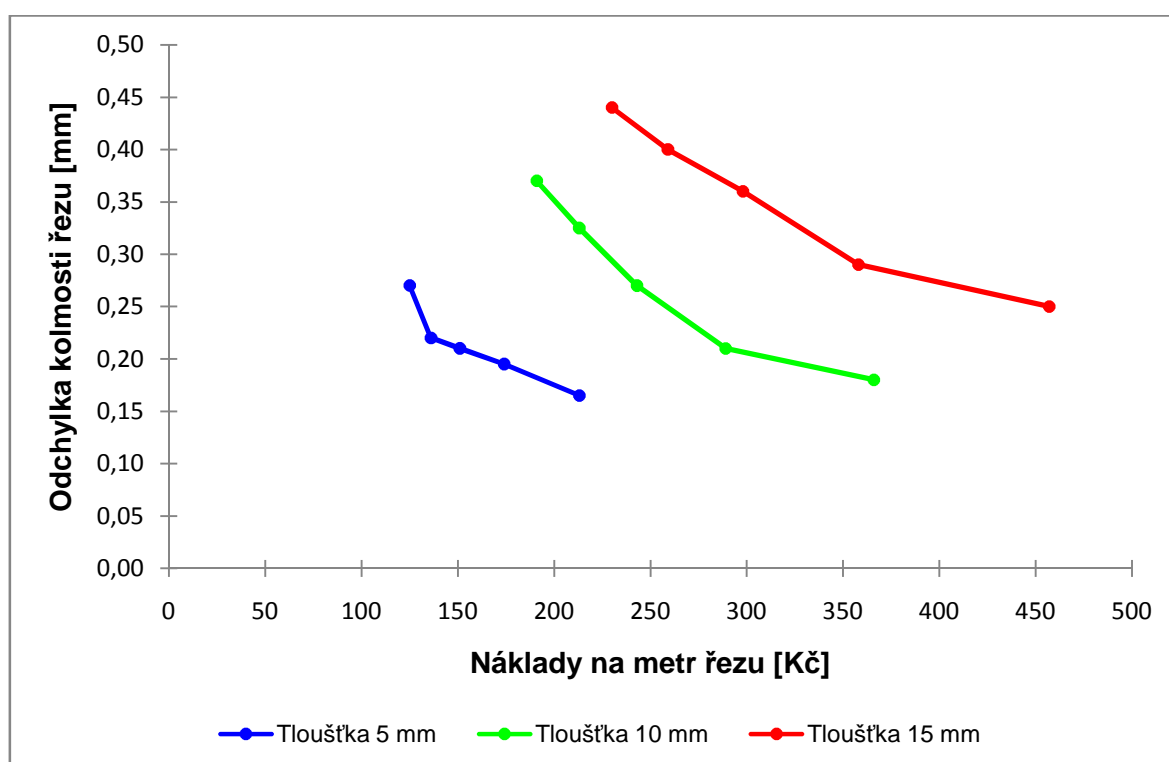
V této podkapitole se nachází tabulka vypočtených hodnot (tab. 6.1). Dále se zde nachází grafy závislostí nákladů na výsledné kvalitě řezu, přičemž první graf znázorňuje průměrnou aritmetickou úchylku R_a v závislosti na nákladech jednoho metru řezu (obr. 6.1) a druhý odchylku kolmosti řezu v závislosti na nákladech jednoho metru řezu (obr. 6.2). V neposlední řadě jsou tyto hodnoty vyhodnoceny.

Tab. 6.1 Vypočtené náklady a kvalita řezu

| Tloušťka materiálu [mm] | Rychlost posuvu [mm.min ⁻¹] | Průměrná aritmetická úchylka R_a [μm] | Odchylka kolmosti řezu [mm] | Náklady na metr řezu [Kč] |
|-------------------------|---|---|-----------------------------|---------------------------|
| 5 | 156 | 4,33 | 0,165 | 213 |
| | 208 | 4,54 | 0,195 | 174 |
| | 260 | 4,75 | 0,21 | 151 |
| | 312 | 5,68 | 0,22 | 136 |
| | 364 | 6,90 | 0,27 | 125 |
| 10 | 78 | 3,96 | 0,18 | 366 |
| | 104 | 3,98 | 0,21 | 289 |
| | 130 | 4,68 | 0,27 | 243 |
| | 156 | 5,39 | 0,325 | 213 |
| | 182 | 6,56 | 0,37 | 191 |
| 15 | 60 | 4,29 | 0,25 | 457 |
| | 80 | 4,24 | 0,29 | 358 |
| | 100 | 4,60 | 0,36 | 298 |
| | 120 | 5,93 | 0,4 | 259 |
| | 140 | 7,80 | 0,44 | 230 |



Obr. 6.1 Graf závislosti průměrné aritmetické úchylny R_a na celkových nákladech při řezu oceli S355J0 10025-2:2004



Obr. 6.2 Graf závislosti odchylny kolmosti na celkových nákladech při řezu oceli S355J0 10025-2:2004

DISKUZE

Jak je patrné z technicko-ekonomického vyhodnocení v kapitole 6, náklady na řez výrazně ovlivňuje parametr rychlosti posuvu řezací hlavice. Tedy čím vyšší je rychlost posuvu, tím menší jsou náklady, zároveň však dochází i ke zhoršení kvality řezu.

Experiment zjištění kvality řezu v souvislosti se změnami technologických podmínek v kapitole 5 dokazuje, že se změnou rychlosti posuvu řezací hlavice se nejvýrazněji mění průměrná aritmetická úchylka profilu R_a v dolní kontuře. Od změny R_a v horní kontuře a velikosti odchylky kolmosti řezu na rychlosti posuvu řezací hlavice, která se mění bez výraznějších změn (v některých případech dokonce skoro lineárně), se právě R_a v dolní kontuře chová naprosto odlišně a v určitém okamžiku zde dochází ke skokové změně. Tuto změnu lze vysvětlit vznikem deformační zóny řezu ve spodní kontuře. Je proto nutné určit oblast, kde se nachází tato prudká změna drsnosti a stanovit optimální velikost rychlosti posuvu řezací hlavice právě před touto oblastí.

Zde však narážíme na ekonomickou výhodnost řezání. Například při řezání oceli je nutné dodržet jistou kvalitu řezu, která je požadována od zákazníka. Proto zde volíme rychlost posuvu řezací hlavice v oblasti před skokovou změnou drsnosti. Avšak při řezání materiálů jako je plast, kde kvalita řezu není ve většině případů požadována, se velikost posuvu řezací hlavice volí větší a nachází se v oblasti po skokové změně drsnosti.

V následujících tabulkách jsou uvedeny optimální rychlosti posuvu řezací hlavice volené firmou AWAC spol. s.r.o. (tab. 7.1) a experimentálně získané optimální rychlosti nacházející se před náhlou změnou drsnosti povrchu (tab. 7.2).

Tab. 7.1 Optimální rychlosti posuvu řezací hlavice volené firmou Awac spol. s.r.o.

| Materiál | Tloušťka vzorku [mm] | Rychlost posuvu řezací hlavice [mm.min ⁻¹] | R_a v dolní kontuře vzorku [μm] | Odchylka kolmosti řezu [mm] |
|----------|----------------------|--|-----------------------------------|-----------------------------|
| Ocel | 5 | 260 | 4,75 | 0,21 |
| | 10 | 130 | 4,68 | 0,27 |
| | 15 | 100 | 4,56 | 0,36 |
| Hliník | 5 | 520 | 6,92 | 0,18 |
| | 10 | 250 | 5,31 | 0,18 |
| | 15 | 135 | 4,79 | 0,19 |
| Plast | 5 | 1000 | 9,52 | 0,12 |
| | 10 | 500 | 11,00 | 0,17 |
| | 15 | 400 | 11,88 | 0,26 |
| Sklo | 5 | 600 | 6,33 | 0,05 |
| | 10 | 300 | 5,76 | 0,11 |
| | 15 | 180 | 5,42 | 0,11 |

Tab. 7.2 Experimentálně získané optimální rychlosti nacházející se v oblasti před náhlou změnou drsnosti povrchu v dolní kontuře vzorku

| Materiál | Tloušťka vzorku [mm] | Rychlost posuvu řezací hlavice [mm.min ⁻¹] | Ra v dolní kontuře vzorku [mm] | Odchylka kolmosti řezu [mm] |
|----------|----------------------|--|--------------------------------|-----------------------------|
| Ocel | 5 | 260 | 4,75 | 0,21 |
| | 10 | 104 | 3,98 | 0,21 |
| | 15 | 100 | 4,56 | 0,36 |
| Hliník | 5 | 312 | 5,26 | 0,14 |
| | 10 | 300 | 5,28 | 0,21 |
| | 15 | 135 | 4,79 | 0,19 |
| Plast | 5 | 1000 | 9,52 | 0,12 |
| | 10 | 300 | 8,90 | 0,13 |
| | 15 | 240 | 9,27 | 0,16 |
| Sklo | 5 | 480 | 5,63 | 0,04 |
| | 10 | 300 | 5,76 | 0,11 |
| | 15 | 180 | 5,42 | 0,11 |

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zaměřuje na problematiku řezání abrazivním vodním paprskem, zejména pak na souvislost kvality řezu s řeznými parametry a lze ji rozdělit na dvě části – teoretickou a praktickou.

Prvním cílem teoretické části bylo objasnění principu technologie vodního paprsku, především pak rozboru jeho technologie a popis zařízení pro řezání vodním paprskem. Dalším cílem práce byl rozbor technologických možností vodního paprsku, v němž bylo poukázáno na širokou škálu technologií dělení vodním paprskem a na jejich využití v různých odvětvích průmyslu. V neposlední řadě tato diplomová práce popsala teorii problematiky souvislosti vad řezu s technologickými parametry při řezání vodním paprskem.

Praktická část diplomové práce se zaměřila na experiment, jenž měl odhalit souvislost kvality řezu se změnami technologických parametrů, a to druhu a tloušťce řezaného materiálu a rychlosti posuvu řezací hlavice. Na základě vzorků nařezaných při variaci těchto parametrů byly získány grafy závislostí průměrných aritmetických úchylek profilu Ra a velikostí odchylek kolmosti řezu na rychlostech posuvu řezací hlavice.

Z takto získaných informací byla následně stanovena oblast, ve které dochází ke skokové změně průměrné aritmetické úchylny profilu Ra v dolní kontuře řezaných vzorků. Právě před touto oblastí je zvolení rychlosti posuvu řezací hlavice optimální, pokud chceme dosáhnout nejvyšší, a tedy i ekonomicky výhodné rychlosti, při které ještě nedochází k prudkému zhoršení kvality povrchu řezaného materiálu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technologie*. 1. vyd. Košice: Viena, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
2. BARCAL, Jaroslav. *Nekonvenční metody obrábění*. Skriptum FSI ČVUT. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1989.
3. KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Brno: CERM, 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.4.
4. *Archived newsletters*. [online]. WaterJet Technology Association. [vid. 7. listopadu 2012]. Dostupné z: <<http://www.wjta.org/wjta/Newsletters.asp>>
5. PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Brno: CERM, 2009. 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
6. *Abrazivní řezání vodním paprskem*. [online]. Flow International Corporation. [vid. 15. listopadu 2012]. Dostupné z: <<http://www.flowcorp.cz/abrazivni-rezani-vodnim-paprskem-28/>>
7. DVOŘÁKOVÁ, Jana, DVOŘÁK, Jaromír. *Technologie WJM/AWJ pro řezání pevných materiálů vodním paprskem* [online]. MM průmyslové spektrum. [vid. 21. listopadu 2012]. Dostupné z: <<http://www.glassrevue.com/news.asp@nid=6113&cid=6.html>>
8. SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I*. Ostrava: Vysoká škola Báňská, 2009. ISBN 978-80-248-2107-8.
9. HUMÁR, Anton. *Technologie I – Technologie obrábění – 3. část* [online]. *Obor technologie obrábění*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005. [vid. 29. listopadu 2012]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-3cast.pdf>
10. *Flow Waterjet Cutting Systems*. [online]. Flow International Corporation. [vid. 23. listopadu 2012]. Dostupné z : <<http://www.flowwaterjet.com/en/waterjet-cutting/cutting-systems.aspx>>
11. *Pumps*. [online]. Multi Pression L.C. inc. [vid. 4. prosince 2012]. Dostupné z: <<http://www.multipressionlc.com/en/categories/Pumps/9/>>
12. *Aplikace a výrobky*. [online]. Flow International Corporation. [vid. 5. prosince 2012]. Dostupné z : <<http://www.flowwaterjet.com/cs-CZ/default.aspx>>
13. *AccuStream waterjet parts for flow equipment*. [online]. Accustream company. [vid. 13. prosince 2012]. Dostupné z: <<http://www.accustream.com/waterjet-parts/flow.html>>
14. *High Pressure Tubing*. [online]. High pressure Technologies, LLC. [vid. 19. prosince 2012]. Dostupné z: <http://www.highpressuretech.com/HP_Tubing.html>

15. KRAJNÝ, Zdenko. *Vodný lúč v praxi - WJM*. 1. vyd. Bratislava: Ing. Michal Mračko 1998. 195 s. ISBN 80-8057-091-4.
16. *Water jet cutting nozzles*. [online]. Wikimedia Commons. [vid. 27. prosince 2012]. Dostupné z: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Water_jet_cutting_nozzles.jpg>
17. *Systémy dělení materiálů*. [online]. AWAC, spol. s.r.o. [vid. 2. ledna 2013]. Dostupné z: <<http://www.awac.cz>>
18. *Řezání vodním paprskem*. [online]. MM průmyslové spektrum. [vid. 10. ledna 2013]. Dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/rezani-vodnim-paprskem.html>>
19. *Vysokotlaký vodní paprsek*. [online]. PTL spol. s.r.o. [vid. 16. ledna 2013]. Dostupné z: <<http://www.ptv.cz/jnp/cz/reference/reference-sectionContent.html>>
20. VALÍČEK, Jan a Sergej HLOCH. *Měření a řízení kvality povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením*. 1. vyd. Ostrava: ÁMOS Mgr. Zdeňka Pustínová, 2008. 128 s. ISBN 978-80-254-3588-5.
21. OSIČKA, Karel a Milan KALIVODA. *Nekonvenční technologie obrábění. (vzdělávací a tréninkový modul)* Brno: Fakulta strojního inženýrství VUT, 2012. 96 s.
22. *CryoJet*. [online]. Wikimedia Commons. [vid. 24. ledna 2013]. Dostupné z: <<http://en.wikipedia.org/wiki/CryoJet>>
23. *Water Jet Cutting*. [online]. Metal Fab Products, INC. [vid. 30. ledna 2013]. Dostupné z: <<http://www.metalfabproducts.com/index-4.html>>
24. *Technologie řezání vodním paprskem*. [online]. Flow International Corporation. [vid. 7. února 2013]. Dostupné z: <<http://www.flowcorp.cz/technologie-rezani-vodnim-paprskem-26/>>
25. *Nové oblasti využití vysokorychlostního vodního paprsku*. [online]. Ústav geoniky AV ČR, v.v.i. [vid. 13. února 2013]. Dostupné z: <<http://www.ugn.cas.cz/index.php?l=cz&p=depart/depart-22/wjet-utilization.php>>
26. *Frézování a glavírování nekonvenčními technologiemi AWJ*. [online]. MM průmyslové spektrum. [vid. 21. února 2013]. Dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/frezovani-a-gravirovani-nekonvenčni-technologie-awj.html>>
27. *Použití pro řezání vodním paprskem*. [online]. Flow International Corporation. [vid. 27. února 2013]. Dostupné z: <<http://www.flowwaterjet.com/cs-CZ/waterjet-cutting/applications/.aspx>>
28. *Technology Marble Today*. [online]. Marble Today. [vid. 7. března 2013]. Dostupné z: <<http://www.marbletoday.com/technology.php>>
29. *Tepelná ochrana*. [online]. Malá encyklopedie kosmonautiky. [vid. 13. března 2013]. Dostupné z: <<http://mek.kosmo.cz/zaklady/technika/ochrana.htm>>

30. *Micro Waterjet Cutting*. [online]. Micro Waterjet LLC. [vid. 21. března 2013]. Dostupné z: <<http://www.microwaterjet.com/>>
31. *Přesné řezání vodním paprskem*. [online]. Galika cz spol. s.r.o. [vid. 27. března 2013]. Dostupné z: <<http://www.microwaterjet-vodni-paprsek.cz/>>
32. *Cutting food with KMT Waterjet high pressure pumps*. [online]. KMT Waterjet Systems. [vid. 3. dubna 2013]. Dostupné z: <<http://www.kmt-waterjet.com/food-cutting.aspx>>
33. *Food cutting flow waterjet pure water robotics*. [online]. Flow International Corporation. [vid. 4. dubna 2013]. Dostupné z: <<http://www.flowwaterjet.com/en/waterjet-cutting/applications/food%20cutting.aspx>>
34. *Laser Cutting Machines: Manufactured to Perfection*. [online]. Synova s.a. [vid. 11. dubna 2013]. Dostupné z: <<http://www.synova.ch/technology/introduction/>>
35. *Měření a analýza povrchu při řezání abrazivním vodním paprskem*. [online]. MM průmyslové spektrum. [vid. 17. dubna 2013]. Dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/mereni-a-analyza-povrchu-pri-rezani-abrazivnim-vodnim-paprskem.html>>
36. HÍŘEŠ, O., M. HATALA s S. HLOCH. *Delenie kovových materiálů okružnou pílou, vodním proudem a plazmovým oblúkem*, 1. vyd. Ostrava – Poruba: Jiří Pustina, 2007. 147 s. ISBN 978-80-8073-769-6
37. *Kvalita a cena*. [online]. CHPS s.r.o. [vid. 18. dubna 2013]. Dostupné z: <<http://www.chps.cz/vodni-paprsek/kvalita-a-cena.html>>
38. *Form Talysurf Intra*. [online]. Taylor Hobson Ltd [vid. 20. dubna 2013]. Dostupné z: <[http://www.imeco-th.cz/Download/Prospekty/INTRA\(CZ\).pdf](http://www.imeco-th.cz/Download/Prospekty/INTRA(CZ).pdf)>
39. *European steel and alloy grades*. [online]. Kharkiv polytechnic insitute [vid. 18. dubna 2013]. Dostupné z: <http://www.splav.kharkov.com/steelgrade/mat_start_eu.php?name_id=2>
40. *Aluminium EN AW 5038*. [online]. Rautaruukki Corporation [vid. 24. dubna 2013]. Dostupné z: <<http://www.ruukki.com/Products-and-solutions/Stainless-steel-and-aluminium-products/Aluminium-flat-products/Aluminium-EN-AW-5083>>
41. *Katalog polotovarů 2013*. [online]. Simona–Plastic Cz, s.r.o. [vid. 24. dubna 2013]. Dostupné z: <http://www.simona.de/static/sites/default/de/assets/Informationsmaterial/tschechisch/kataloge/Halbzeuge_tsch.pdf>
42. PROKOP, Jaroslav. *Přednáška HTV 2012/13 Výběr optimální varianty obráběcího stroje*. HTV – Technologická příprava výroby. UST FSI VUT v Brně 2013

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

| Zkratka | Jednotka | Popis |
|---------|----------|---|
| ASJ | [-] | Obrábění pomocí přímého vstřikování abraziva (Abrasive Slurry Jet) |
| AWJ | [-] | Obrábění abrazivním vodním paprskem (Abrasive Water Jet) |
| CAD/CAM | [-] | Počítačem podporované navrhování a výroba (Computer Aided Design / Computer Aided Manufacturing) |
| CNC | [-] | Řízení stroje počítačem (Computer Numeric Control) |
| DWJ | [-] | Dynamické obrábění vodním paprskem (Dynamic Water Jet) |
| EDM | [-] | Elektroerozivní obrábění (Electrical Discharge Machining) |
| IJM | [-] | Obrábění ledovou tříští (Ice Jet Machining) |
| LMJ | [-] | Obrábění vodním paprskem za pomoci laseru (Laser Micro Jet) |
| MWJ | [-] | Obrábění velmi tenkým vodním paprskem (Micro Water Jet) |
| WJM | [-] | Obrábění čistým vodním paprskem (Water Jet Machining) |

| Symbol | Jednotka | Popis |
|-----------|-------------------------|---------------------------------------|
| A_5 | [%] | Tažnost |
| C_f | [-] | Koeficient odporu stěny materiálu |
| C_k | [-] | Koeficient charakteristické rychlosti |
| C_l | [-] | Koeficient druhu řezaného materiálu |
| L | [rok] | Doporučená životnost stroje |
| M_{tAC} | [Kč.hod ⁻¹] | Mzdový tarif |
| N | [Kč] | Celkové náklady |
| N_a | [Kč.hod ⁻¹] | Náklady na abrazivo |
| N_e | [Kč.hod ⁻¹] | Náklady na energii a vodu |
| N_{hs} | [Kč.hod ⁻¹] | Náklady na hodinu provozu stroje |

| Symbol | Jednotka | Popis |
|------------|-------------------------|--------------------------------------|
| N_m | [Kč] | Náklady na mzdy a provozní režii |
| N_o | [Kč.hod ⁻¹] | Náklady spojené s odpisem stroje |
| N_{ps} | [Kč] | Náklady na provoz stroje |
| N_u | [Kč.hod ⁻¹] | Náklady na údržbu stroje |
| PC | [Kč] | Pořizovací cena stroje |
| R | [%] | Provozní režie |
| R_a | [μm] | Průměrná aritmetická úchylka profilu |
| R_c | [μm] | Průměrná výška profilu |
| R_e | [MPa] | Mez kluzu |
| R_m | [MPa] | Mez pevnosti |
| R_p | [μm] | Největší výška výstupku profilu |
| $R_{p0,2}$ | [MPa] | Smluvní mez kluzu |
| R_v | [μm] | Největší hloubka profilu |
| R_y | [μm] | Nejvyšší výška profilu |
| R_z | [μm] | Největší výška profilu |
| d_a | [mm] | Průměr abrazivní trysky |
| h_d | [mm] | Hloubka deformační zóny |
| h_z | [mm] | Hloubka řezné zóny |
| l | [mm] | Délka řezu |
| l_r | [mm] | Relativní délka profilu |
| m_a | [kg.s ⁻¹] | Hmotnostní tok abraziva |
| s | [%] | Odpisová sazba |
| t_f | [hod] | Pracovní fond stroje |
| t_{ma} | [min] | Jednotkový čas stroje |
| t_{ma41} | [min] | Jednotkový čas hlavního chodu stroje |

| Symbol | Jednotka | Popis |
|---------------|-------------------------|---------------------------------------|
| t_{ma42} | [min] | Jednotkový čas pomocného chodu stroje |
| t_{ma5} | [min] | Jednotkový čas klidu stroje |
| v_a | [m.s ⁻¹] | Rychlost pohybu částic abraziva |
| v_c | [m.s ⁻¹] | Kritická rychlost částic abraziva |
| v_p | [mm.min ⁻¹] | Rychlost posuvu řezací hlavy |
| ρ_p | [kg.m ⁻³] | Hustota materiálu abraziva |
| σ_{kl} | [MPa] | Mez kluzu řezaného materiálu |

SEZNAM PŘÍLOH

- | | |
|-----------|--|
| Příloha 1 | Ukázka výstupu měření profilometrem (měření vzorku z plastického materiálu PE-HWU tloušťky 10 mm v horní kontuře, rychlost posuvu řezací hlavice 300 mm.min ⁻¹). |
| Příloha 2 | Ukázka výstupu měření profilometrem (měření vzorku z plastického materiálu PE-HWU tloušťky 10 mm v horní kontuře, rychlost posuvu řezací hlavice 400 mm.min ⁻¹). |
| Příloha 3 | Ukázka výstupu měření profilometrem (měření vzorku z plastického materiálu PE-HWU tloušťky 10 mm v horní kontuře, rychlost posuvu řezací hlavice 500 mm.min ⁻¹). |
| Příloha 4 | Ukázka výstupu měření profilometrem (měření vzorku z plastického materiálu PE-HWU tloušťky 10 mm v horní kontuře, rychlost posuvu řezací hlavice 600 mm.min ⁻¹). |
| Příloha 5 | Ukázka výstupu měření profilometrem (měření vzorku z plastického materiálu PE-HWU tloušťky 10 mm v horní kontuře, rychlost posuvu řezací hlavice 700 mm.min ⁻¹). |

